

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ**

Снитовский Юрий Павлович

кандидат технических наук,
доцент кафедры микро- и нанoeлектроники,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Минск, Белоруссия
SPIN: 7996-5717
E-mail: yu.snitovsky@tut.by

Предмет исследования: влияния концентрации и состава легирующих элементов Mn, Ti, Cr, Y, Mo, W, V на изменение температуры рекристаллизации алюминия.

Цель работы: поиск оптимальной концентрации легирующих добавок, при которых температура рекристаллизации достигает максимальной величины.

Методы и объекты исследования: методами термодинамического анализа бинарных диаграмм состояния алюминия с легирующими добавками установлено, что характер изменения температуры рекристаллизации зависит от того, к какому типу эвтектической или перитектической реакции относится образование интерметаллических соединений.

Основные результаты исследования: для системы Al–Mn оптимальным содержанием Mn следует считать 0,2%, для системы Al–Cr максимальное увеличение температуры рекристаллизации Al наблюдается при 0,6% Cr, для системы Al–Y механические свойства Al при повышенных температурах максимальны при 1% Y.

Ключевые слова: легирование алюминия, температура рекристаллизации, эвтектика, перитектика, система Al–Mn, Al–Cr, Al–Y, оптимизация состава сплава.

**CHANGES IN THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
OF ALUMINUM DEPENDING ON THE COMPOSITION
OF THE ALLOYING ELEMENTS**

Yuri P. Snitovsky

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus
SPIN: 7996-5717
E-mail: yu.snitovsky@tut.by

Subject of research: the influence of the concentration and composition of alloying elements Mn, Ti, Cr, Y, Mo, W, V on the change in the aluminum recrystallization temperature.

Purpose of research: to find the optimal concentration of alloying additives, at which the recrystallization temperature reaches its maximum value.

Methods and objects of research: using the methods of thermodynamic analysis of binary state diagrams of aluminum with alloying additives, it has been established that the nature of the change in the recrystallization temperature depends on what type of eutectic or peritectic reaction the formation of intermetallic compounds belongs to. It is shown that aluminides act as alloy modifiers and impart high mechanical properties to products.

Main results of research: it was found that for the Al–Mn system, the optimal content of Mn should be considered 0.2%, for the Al–Cr system, the maximum increase in the Al recrystallization temperature is observed at 0.6% Cr, for the Al–Y system, the mechanical properties of Al at elevated temperatures maximum at 1% Y.

Keywords: aluminum alloying, recrystallization temperature, eutectic, peritectic, Al–Mn, Al–Cr, Al–Y systems, alloy composition optimization.

Введение

Алюминий и его соединения широко используют в микроэлектронике для проводящей металлизации полупроводниковых приборов и ИМС, а его полупроводниковые соединения типа $A^{III}B^V$, как акцепторная примесь в Si и Ge, в виде Al_2O_3 – для создания гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС). На практике, процесс легирования алюминия ограниченным числом примесей сопровождается образованием интерметаллидов, играющих роль модифицирующих добавок, необходимых для изменения структуры и получения заранее заданного улучшения механических свойств конечного сплава [1].

Цель работы – поиск оптимальной концентрации легирующих добавок, при которых температура рекристаллизации достигает максимальной величины, а модификация структуры алюминиевых сплавов, путем введения в расплав небольших добавок некоторых тугоплавких металлов, может значительно улучшить их физико-механические свойства.

Результаты и обсуждение

Общие вопросы технологии получения и модификации свойств чистого алюминия

В промышленной технологии металлургии для получения чистого алюминия можно выделить ряд общих этапов, в целом присущих производству подавляющего большинства металлов [2]. К ним относятся этапы обогащения состава перерабатываемых руд, последующие процессы восстановления металлов, плавки и рекристаллизации со структурной модификацией свойств. Гидролитическое осаждение широко используются для очистки растворов от примесей и для выделения редких металлов Ti и Zr (осаждение основных сульфатов этих металлов), Nb и Ta, V, W и Mo (осаждение нерастворимых кислот), в гидрометаллургии рассеянных редких металлов (Ga, In, Ge). Нерастворимые продукты гидролиза начинают осаждаться при определенном значении pH раствора. В работе [2] приведены характерные значения pH, которые соответствуют процессам выделения нерастворимых продуктов гидролиза для ряда металлов (Al, Ti, Nb, W, Mo и др.).

Существует несколько способов получения металлов из их соединений. Основу составляют реакции восстановления. Для выделения из оксидов щелочных, щелочноземельных и редкоземельных металлов Al, Ta, Nb, V, Ti, Zr, Be применяется способ электролиза из расплавленных солей или их эвтектических смесей с минимальной температурой плавления. В результате электролиза глинозема (Al_2O_3) получают алюминий, физико-механические свойства которого зависят от химической чистоты Al и содержания примесей в нём. Потенциал ионизации первого валентного 3p-электрона атома Al составляет 137,3, а второго и третьего 3s-электронов соответственно 430,6 и 652,1 ккал/г-атом (или 5,98; 18,82 и 28,44 эВ). Поэтому в атоме Al 3p-электрон удерживается слабее, чем каждый из спаренных 3s-электронов. Отсюда – возможность образования алюминием не только обычных для него трехвалентных ионов (Al^{3+}), но и одновалентных (Al^+), которым соответствуют соединения низшей валентности (субсоединения) Al_2O , AlF , $AlCl$ и др. Эти соединения имеют не только теоретический интерес, но и имеют прикладное значение для получения особо чистого алюминия и др. [3]. Некоторые физические постоянные для алюминия при нормальных условиях приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные физико-химические свойства алюминия [2, 4]

Теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, кг/м ³	$T_{пл}$, °С	$T_{кип}$, °С	Удельное сопротивление, Ом·м	$\Delta H_{пл}$, кДж/моль	Атомный радиус, нм
1255,8	217,7	2698	660,37	2470	$2,65 \cdot 10^{-8}$	10,67	0,1431

На воздухе Al покрывается тонкой прочной пленкой оксида Al_2O_3 , защищающего металл от дальнейшего окисления, что определяет его высокую коррозионную стойкость. Хотя алюминий является одним из благородных промышленных металлов, он достаточно устойчив во многих окислительных средах. Причиной такого поведения является наличие непрерывной оксидной пленки Al_2O_3 на поверхности алюминия, которая определяет его высокую коррозионную стойкость при воздействии кислорода, воды или других окислителей. Это объясняется тем, что молекулярный объем Al_2O_3 почти в 1,3 раза больше, чем объем алюминия, поэтому поверхностный слой Al_2O_3 находится под действием сжимающих напряжений и быстро восстанавливается при повреждении. В расплавленном состоянии Al взаимодействует с рядом металлов и неметаллов, образуя весьма тугоплавкие сплавы, в которых содержатся интерметаллические соединения, придающие конечному продукту высокую твердость или жаропрочность, например, $CuAl_2$, $CrAl_7$, $TiAl_3$, $FeAl_3$ и др. [5]. При этом, образовавшиеся интерметаллиды алюминия играют роль наноразмерных центров концентрации напряжений, выступая в качестве естественных модификаторов сплавов и придают высокие механические свойства изделиям из них.

Влияние легирования на физико-механические свойства алюминия

В процессе легирования алюминия, при целенаправленном улучшении важных для практического применения физико-химических свойств, таких как прочность, твердость, жаропрочность и другие специфические свойства, зачастую наблюдается одновременное снижение электропроводности, нежелательное ухудшение коррозионной стойкости и почти неизбежное увеличение удельного веса. Поэтому для поиска оптимальных режимов важно учитывать особенности структурно-фазовых изменений в процессе рекристаллизации сплавов алюминия, модифицированных легирующими добавками.

В [6] показано, что качество слитков из алюминиевых и других сплавов можно значительно улучшить путем введения в расплав небольших добавок некоторых тугоплавких металлов, в корне меняющих весь ход процесса затвердевания слитков, модифицируя их структуру. При проведении исследований исходили из общеизвестного положения, заключающегося в том, что *число зерен, образующихся в единице объема при кристаллизации металла или сплава* находится в прямой зависимости от числа зародышей в расплаве. И в обратной зависимости от *скорости роста кристаллов*.

Число центров кристаллизации можно увеличить путем замешивания в расплав посторонних тугоплавких частиц, которые при определенных условиях будут выполнять роль зародышевых центров. Такая искусственная интенсификация процессов «несамопроизвольной» кристаллизации (кристаллизация на готовых поверхностях), как известно приводит к измельчению зерна. Однако способ замешивания тугоплавких частиц («затравок») мало применим для больших масс металла вследствие невозможности равномерного распределения этих частиц по всему объему расплава.

Подобные тугоплавкие частицы можно создать искусственно – введением соответствующих добавок на основе химического взаимодействия этих добавок с компонентами сплава. Вероятно, вводимая в качестве модификатора добавка должна удовлетворять прежде всего следующим требованиям. Добавка должна образовывать химические соединения по крайней мере с одним из компонентов сплава. Для повышения вероятности образования частиц соединений и повсеместного их распределения в расплаве желательно, чтобы вводимая добавка образовывала *соединение* с основным компонентом сплава. Это соединение должно кристаллизоваться раньше, чем модифицируемое зерно. Во избежание заметного изменения химического и фазового состава сплава добавка должна образовывать соединение при возможно *меньших* концентрациях.

Некоторыми руководящими материалами при подборе добавок в первом приближении могут служить двойные диаграммы состояния, характеризующие взаимодействие вводимой добавки с компонентами сплава [6]. Наиболее эффективными модификаторами будут такие, которые дают с основным компонентом сплава диаграммы состояния эвтектического или перитектического типа, с сильно сдвинутым ликвидусом химического соединения, в сторону этого компонента. В этом случае при переходе за концентрацию эвтектической или перитектической точки, в жидкости первоначально будут образовываться частицы соответствующих химических соединений, которые в дальнейшем и могут служить центрами кристаллизации.

В применении к алюминию и его сплавам указанными условиями удовлетворяют переходные элементы: Ti, Zr, V, Ta, Nb, Cr, Mo, W и В. При малых концентрациях (от сотен до десятых долей процента) они образуют с алюминием химические соединения, которые кристаллизуются раньше, чем сам алюминий или твердые растворы на его основе.

Исследования макро- и микроструктуры сплавов показали, что общие закономерности воздействия добавок, отмеченные на чистом алюминии, сохраняются и для сплавов. При введении малых добавок переходных элементов в сплавах, так же, как и в чистом алюминии, наблюдается сильное измельчение зерна и полностью устраняется зональность в строении отливок. Характерной особенностью модифицирующего влияния добавок в сплавах является их более высокая эффективность. Для получения одного и того же, например, эффекта измельчения зерна в чистом алюминии требуется добавка 0,1 % Ta или 0,2 % Ti. Тогда как в сплаве АМц (1,6% Mn, 0,3% Si, 0,3% Fe, остальное Al) требуется 0,04–0,05% Ta или 0,1% Ti и т. д. Это установлено также и в отношении других сплавов с различными добавками. Кроме этого, в сплавах значительно расширяется круг модифицирующих добавок. Например, многие из тугоплавких элементов, такие как V, Mo, W, будучи малоактивными в среде чистого алюминия, становятся весьма активными модификаторами в сплавах. Причина такого явления объяснена в [6].

Известно [7], что рекристаллизация сопряжена с перемещением атомов, зависящим от энергии активации. Следовательно, искать наличие связи между температурой рекристаллизации и температурой плавления вполне закономерно. Температура рекристаллизации алюминия зависит от чистоты. Алюминий чистотой порядка 99,994% имеет температуру рекристаллизации 270 °С [3]. Повышение степени очистки алюминия до 99,999% снижает температуру рекристаллизации на несколько десятков градусов. Алюминий зонной плавки (чистота 99,999–99,99999%) рекристаллизуется в течение нескольких суток при –37 °С. Легирующие элементы, образующие с алюминием интерметаллические соединения, резко повышают температуру рекристаллизации. К таким элементам относятся Mn, Ti, Cr, Y, Mo, W, V.

Диаграмма состояния системы Al–Mn, содержащей до 4 % Mn, относится к эвтектическому типу. Температура эвтектики 658 °С. Второй фазой в эвтектике является $MnAl_6$. Согласно работе [3], температура рекристаллизации алюминия различной чистоты в зависимости от содержания Mn повышается следующим образом (см. табл. 2).

Таблица 2 – Температура рекристаллизации алюминия различной чистоты в зависимости от содержания марганца [3]

Содержание марганца, в %	Марка алюминия	
	Технический	Чистый
0,0	280-350 °С	250-310 °С
0,1	300-390 °С	300-330 °С
0,15	-	300-350 °С
0,2	305-390 °С	300-375 °С

Обсуждение результатов легирования Al – Ti/Cr/Y

Диаграмма состояния системы Al–Ti относится к перитектическому типу. Перитектическая реакция происходит при 665 °С между жидкостью, содержащей 0,15% Ti и соединением $TiAl_6$ с образованием твердого раствора. По данным [9] добавка Ti до 0,05% практически не

изменяет температуру рекристаллизации чистого Al. При 0,2% Ti наблюдается хорошо выраженный максимум температуры рекристаллизации [10].

Диаграмма равновесия системы Al–Cr со стороны алюминия относится к перитектическому типу. Перитектическая реакция происходит при 661 °С между жидкостью, содержащей 0,41% Cr и соединением CrAl_7 с образованием твердого раствора, содержащего 0,37% Cr. По данным работы [3] температура рекристаллизации Al при добавке 1% Cr повышается до 500 °С. В [10] установлено, что максимальное увеличение температуры рекристаллизации Al наблюдается при 0,6% Cr.

Диаграмма состояния системы Al–Y относится к эвтектическому типу со стороны чистого Al [11]. Эвтектика алюминий + YAl_3 плавится при 650 °С. Данные по влиянию Y на температуру рекристаллизации Al в литературе отсутствуют, однако в работах [12, 13] было установлено, что механические свойства Al при повышенных температурах максимальны при 1% Y. Так при 300 и 350 °С прочность сплава с 1% Y в 2 раза, а при 400 °С – в 1,5 раза выше, чем у сплава без Y. Известно, что между температурой рекристаллизации сплавов и их жаропрочностью имеется прямая связь. Поэтому по данным этих работ следует рассматривать сплав алюминия с добавками 1% Y как перспективный с точки зрения его электромиграционных свойств.

Самой высокой стабильностью свойств при повышенных температурах отличаются сплавы алюминий–оксид алюминия [14]. Стабильность свойств объясняется исключительно низкой растворимостью оксида алюминия в твердом алюминии. Температура рекристаллизации сплавов алюминий–оксид алюминия самая высокая порядка 550–600 °С [14, 15]. Резкое повышение температуры рекристаллизации наблюдается уже при 0,1 % оксида алюминия. Увеличение содержания оксида алюминия вплоть до 10–12% монотонно повышает температуру рекристаллизации.

В работе [16] исследовано влияние на электропроводность электрически рафинированного алюминия 99,99% небольших примесей различных металлов. Согласно данным этих авторов, металлы по степени их влияния на снижение электропроводности алюминия можно разбить на следующие 3 группы: 1) Au, Be, Ni, Si, Fe, Zn – в малой степени влияющие на электропроводность Al; 2) Cu, Ag, Mg – более сильно снижающие электропроводность Al; 3) Ti, V, Mn, Cr – очень сильно снижающие электропроводность Al. Третья группа элементов наиболее сильно повышает температуру рекристаллизации Al. Поэтому следует искать компромисс между повышением температуры рекристаллизации и снижением электропроводности. С этой целью следует назначать минимальное содержание легирующих элементов, идущих на изготовление токоведущих дорожек в полупроводниковых приборах. Иттрий [17] и оксид алюминия незначительно уменьшают электропроводность алюминия. Данные по влиянию легирования на механические свойства алюминиевой фольги можно найти в монографии [18].

При содержании 1–5% оксида алюминия изменение электропроводности следует аддитивному закону [3]. Поэтому сплавы алюминия с иттрием и оксидом алюминия предпочтительны и с точки зрения электропроводности.

Наиболее сильными модификаторами алюминиевых сплавов являются скандий, цирконий и иттрий [19]. Добавление всего 0,1–0,2% скандия и циркония увеличивает прочность Al в 3 раза и эти добавки дают стабильность свойств при нагревании до 350 °С. Введение их в сплавы на основе алюминия придают деформированным сплавам высокую прочность, свариваемость, виброустойчивость, коррозионную стойкость.

Введение 0,3% скандия предотвращает распухание конструкционных материалов ядерных реакторов [20, 21]. Эти свойства резко расширяют области применения легких сплавов в технике.

В [22] рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований анизотропии физических свойств металлов и сплавов с различной симметрией кристаллической решетки, причины, обуславливающие анизотропию физических свойств металлических материалов, методы расчета анизотропии свойств. Показаны возможности получения изделий и полуфабрикатов с благоприятной кристаллографической структурой, способствующей повышению уровня их прочности, увеличению срока их службы, сокращению расхода материалов.

Характерной чертой тонких пленок, конденсированных из объемной паровой фазы, является большой удельный вклад поверхностной энергии по сравнению с объемной. С другой стороны, им присущ высокий уровень структурных несовершенств, обычно недостижимый в образцах металлургического происхождения. Для пленок характерны малые размеры блок-кристаллитов и большие углы их разориентировки, высокая плотность дислокаций и точечных дефектов, а также присутствие значительных по величине микро- и макронапряжений [23]. Несомненно, что основное различие в процессах электромиграции в массивном образце и в тонкой пленке заключается в разных механизмах переноса – по решетке и по границам зерен.

С целью снижения электромиграции по границам зерен в пленке алюминия в нее обычно вводят небольшое количество легирующих элементов. Добавка меди, как известно, позволяет увеличить устойчивость к электромиграции пленок алюминия [24-29]. Кроме этого, защита пленок алюминия с добавками меди диоксидом кремния является эффективным средством не только для увеличения устойчивости к коррозии этих пленок, но и для снижения электромиграции по поверхности. В дальнейшем появились данные по увеличению устойчивости к электромиграции пленок алюминия при введении в них оксида алюминия [30, 31], кремния [32, 33], меди и оксида алюминия [34], кремния и магния [25], кремния и меди [25, 26], добавок редкоземельных [35, 36], а также переходных металлов [37-40].

Достоверно установлено [25], что добавление третьего элемента (Cu или Mg) в сплав Al-Si позволяет уменьшить размер зерна пленки сплавов Al-Si-Cu, Al-Si-Mg в 2 раза. При этом практически не увеличивается удельное электросопротивление пленок, а за счет добавления 0,5% Cu или Mg зеркалажность увеличивается примерно на 30%. Уменьшенная плотность и размер бугорков пленки сплавов Al-Si-Cu, Al-Si-Mg должны приводить к более надежной адгезии резиста к ним, меньшему количеству проблем с пассивацией и более четким границам раздела между слоями. Кроме этого, пленки сплавов Al-Si-Cu, Al-Si-Mg более однородны, чем пленки сплавов Al-Si, Al-Cu. Согласно данным для сплавов Al-Cu, приведенных в [25], добавление 0,5% Cu в сплав Al-Si должно привести к увеличению сопротивления к электромиграции проводников из этого сплава примерно на порядок. Комбинация меди и магния может быть еще более эффективной для увеличения сопротивления к электромиграции проводников, чем введение каждой из этих добавок в отдельности. Тройные системы Al-Si-Cu, Al-Si-Mg являются более привлекательными, чем двойные Al-Si, Al-Cu. Однако, для получения пленок алюминия с требуемыми свойствами необходима оптимизация состава сплава.

Заключение и выводы

Как было выше неоднократно отмечено, что процесс рекристаллизации, в ходе которого происходит формирование структуры и изменение структурно-чувствительных свойств конечного материала, сопряжен с перемещением атомов, зависящим от энергии активации. Поэтому наличие установленной в данной работе связи между температурой рекристаллизации и температурой плавления представляется вполне закономерным, что позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Третья группа элементов наиболее сильно повышает температуру рекристаллизации Al. Поэтому следует искать компромисс между повышением температуры рекристаллизации и снижением электропроводности. С этой целью следует назначать минимальное содержание легирующих элементов, идущих на изготовление токоведущих дорожек в полупроводниковых приборах.

2. Увеличение содержания оксида алюминия вплоть до 10–12% монотонно повышает температуру рекристаллизации. То есть сплавы алюминий-оксид алюминия имеют более высокую прочность, чем вышеперечисленные, поэтому и эти сплавы следует рассматривать как перспективные с точки зрения их электромиграционных свойств, т.е. движения атомов, которое обусловлено прохождением постоянного тока через проводящий материал.

3. С этой точки зрения сплавы алюминия, имеющие более высокую температуру рекристаллизации должны обладать и более высокой прочностью.

Литература

1. Раскин, А. А. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники : учебное пособие / А. А. Раскин, В. К. Прокофьева. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – Ч. 1. – 165 с. – ISBN 978-5-94774-909-0. – EDN: RBARTZ. – Текст : непосредственный.
2. Рошин, В. М. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники : учебное пособие / В. М. Рошин, М. В. Силибин. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – Ч. 2. – 184 с. – ISBN 978-5-9963-1471-3. – EDN RBARUJ. – Текст : непосредственный.
3. Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов : справочное руководство / под редакцией И. Н. Фридляндера. – Москва : Металлургия, 1971. – 352 с. – Текст : непосредственный.
4. Эмсли Дж. Элементы : перевод с английского / Дж. Эмсли. – Москва : Мир, 1993. – 352 с. – Текст : непосредственный.
5. Интерметаллические соединения : перевод с английского / под редакцией И. И. Корнилова. – Москва : Металлургия, 1970. – 440 с. – Текст : непосредственный.
6. Мальцев, М. В. Модификация структуры слитков алюминиевых сплавов / М. В. Мальцев. – Текст : непосредственный // Легкие сплавы. Вып. 1. Металловедение, термическая обработка, литье и обработка давлением. – Москва : АН СССР, 1958. – С. 273–288.
7. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение : перевод с английского / Л. Ван Флек. – Москва : Атомиздат, 1975. – 472 с. – Текст : непосредственный.
8. Ливанов, В. А. Рекристаллизация сплавов алюминия с марганцем / В. А. Ливанов, В. М. Воздвиженский. – Текст : непосредственный // Труды МАТИ. – 1958. – Вып. 31. – С. 65–83.
9. Harrington, H. H. The effect of single addition on the recrystallization, electrical conductivity and rupture strength of pure aluminum / H. H. Harrington // Transactions of A. S. M. – 1949. – Vol. XLI. – P. 453–459.
10. Елагин, В. И. Влияние некоторых переходных металлов на температуру рекристаллизации алюминия / В. И. Елагин, Е. Ф. Блонина. – Текст : непосредственный // Легкие сплавы и методы их обработки. – Москва : Наука, 1968. – С. 28–37.
11. Каданер, Э. С. Характер взаимодействия редкоземельных металлов с алюминием в двойных и тройных системах / Э. С. Каданер, Н. И. Туркина. – Текст : непосредственный // Проблемы металловедения цветных сплавов. – Москва : Наука, 1978. – С. 71–76.
12. Савицкий, Е. М. Перспективы исследования и применения редкоземельных металлов, сплавов и соединений / Е. М. Савицкий. – Текст : непосредственный // Редкоземельные металлы и сплавы. – Москва : Наука, 1971. – С. 5–17.
13. Сплавы редкоземельных металлов / Е. М. Савицкий, В. Ф. Терехова, И. В. Буров [и др.]. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1962. – 268 с. – Текст : непосредственный.
14. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов : перевод с английского / под редакцией А. Т. Туманова, Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. – Москва : Металлургия, 1972. – 663 с. – Текст : непосредственный.
15. Северденко, В. П. Структура в объеме и на поверхности прокатанных материалов / В. П. Северденко, Л. И. Гурский. – Минск : Наука и техника, 1972. – 308 с. – Текст : непосредственный.
16. Столович, Н. Н. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов / Н. Н. Столович, Н. С. Миницкая. – Минск : Наука и техника, 1975. – 160 с. – Текст : непосредственный.
17. Алюминиевая фольга, применяемая для сборки интегральных схем / Каданер Э. С. [и др.]. – Текст : непосредственный // Проблемы металловедения цветных сплавов. – Москва : Наука, 1978. – С. 145–148.
18. Структура и свойства легированной алюминиевой фольги / М. Е. Дриц, Э. К. Каданер, Л. С. Торопова, И. М. Копьев. – Москва : Металлургия, 1975. – 183 с. – Текст : непосредственный.

19. Яценко, С. П. Снижение энергозатрат при производстве высоколегированных алюминиевых сплавов / С. П. Яценко, Г. М. Рубинштейн, В. М. Скачков. – Текст : непосредственный // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии (ЭКСИЭ'05) : сборник докладов V Международной научно-практической конференции в рамках специализированного форума «Expo Build Russia», Екатеринбург, 14 апреля 2016 года / научный редактор Ф. Н. Сарапулов. – Екатеринбург : УМЦ УПИ, 2016. – С. 75–77.
20. Яценко, С. П. Скандий: получение и применение / С. П. Яценко, Л. А. Пасечник, В. М. Скачков. – EDN TYOUVL. – Текст : непосредственный // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 3 (15). – С. 6.
21. Яценко, С. П. Редкие элементы в алюминиевых сплавах / С. П. Яценко. – Текст : непосредственный // Металлы Евразии. – 2007. – № 2. – С. 66–67.
22. Адамеску, Р. А. Анизотропия физических свойств металлов / Р. А. Адамеску, П. В. Гельд, Е. А. Митюшев. – Москва : Металлургия, 1985. – 138 с. – Текст : непосредственный.
23. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI 10.1088/1742-6596/1281/1/012010. – EDN AVCCTJ // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 14–16.05.2019. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012010.
24. Д'Эрль, Ф. Электромиграция в тонких пленках /Ф. Д'Эрль, Р. Розенберг. – Текст : непосредственный // Физика тонких пленок. – Москва : Мир, 1977. – Т. 7. – С. 284–339.
25. Hartsough, L. D. Aluminum and Aluminum Alloy Sputter Deposition for VLSI / L. D. Hartsough, D. R. Denison // Solid State Technology. – 1979. – Vol. 22, № 12. – P. 66–72.
26. Сплавы на основе алюминия для систем металлизации полупроводниковых приборов и микросхем / Беленький Л.Я. [и др.]. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. – 1978. – Вып. 9 (124). – С. 8–13.
27. Снитовский, Ю. П. Использование меди в соединениях элементов приборов / Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Промышленность Белоруссии. – 1978. – № 6. – С. 68.
28. Колешко, В. М. Массоперенос в тонких пленках / В. М. Колешко, В. Ф. Белицкий. – Минск : Наука и техника, 1980. – 295 с. – Текст : непосредственный.
29. Достанко, А. П. Пленочные токопроводящие системы СБИС / А. П. Достанко, В. В. Баранов, В. В. Шаталов. – Минск : Высшая школа, 1989. – 238 с. – Текст : непосредственный.
30. Patent 3631304 US. Semiconductor device, electrical conductor and fabrication methods therefor : Publ. date 28.12.1971 / Harshad J. Bhatt.
31. Patent 3878442 US. Electrical conductor having a high resistance to electromigration : Publ. date 15.04.1975 / Harshad J. Bhatt.
32. Patent 3609470 US. Semiconductor devices with lines and electrodes, which contain 2 to 3 percent silicon with the remainder aluminum : Publ. date 28.09.1971 / Libertus L. Kuiper.
33. Patent 3567509 US. Metal-insulator films for semiconductor devices : Publ. date 02.03.1971 / Libertus L. Kuiper.
34. Patent 3716469 US. Fabrication method for making an aluminum alloy having a high resistance to electromigration : Publ. date 13.02.1973 / Harshad J. Bhatt, James W. Tuttle.
35. Авторское свидетельство № 598458 А1 СССР, МПК H01L 21/28. Способ многоуровневой металлизации больших интегральных схем : № 2385220 : заявл. 02.07.1976 : опубл. 25.07.1979 / В. М. Колешко ; заявитель Институт Электроники АН Белорусской ССР. – Текст : непосредственный.
36. Распределение текстуры по толщине тонких пленок сплавов алюминия / В. М. Колешко, В. Ф. Белицкий, И. В. Кирюшин [и др.]. – Текст : непосредственный // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1987. – № 12. – С. 76–83.
37. Patent 4017890 US. Intermetallic compound layer in thin films for improved electromigration resistance : Publ. date 12. 04.1977 / James Kent Howard, Paul Siu-Chung Ho.

38. Солоненко, О. П. Плазменная обработка и напыление порошков оксидов металлов, состоящих из полых сфер / О. П. Солоненко, И. П. Гуляев, А. В. Смирнов. – EDN RCVBKD. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 2008. – Т. 34, № 24. – С. 22–27.

39. Criteria for spin instability based on the node distribution in Trace-transform of the SHS combustion wave chronogram / A. Grigoryevskaya, V. Jordan, I. Shmakov, P. Gulyaev. – DOI 10.1088/1742-6596/1745/1/012065. – EDN HAEBNE // Journal of Physics: Conference Series : 6, Samara, 26–29.05.2020. – Samara, 2021. – P. 012065.

40. Величко, А. А. Разработка технологий изготовления электронных приборов на основе оксидов переходных металлов / А. А. Величко, А. Л. Пергамент, Г. Б. Стефанович. – EDN IUJKNT. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2005. – № 8. – С. 44–47.