

Влияние сильных электромагнитных полей на устойчивость элементной базы радиоэлектронных систем

В. Г. Дмитриев, к. т. н., *gejspheres@idg.chph.ru*

Институт динамики геосфер РАН, Москва, Российская Федерация

А. И. Куприянов, д. т. н., профессор, *aik125167@mail.ru*

*ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация*

Ю. М. Перунов, д. т. н., профессор, *gejspheres@idg.chph.ru*

Институт динамики геосфер РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены возможные механизмы, вызывающие деградацию и катастрофические отказы микроэлектронной элементной базы в полях мощного электромагнитного излучения. Проанализированы результаты экспериментальных исследований и модели, используемые для анализа механизмов повреждения современных интегральных микросхем при воздействии радиоизлучения. Определены критериальные уровни функционального поражения полупроводниковых приборов сверхкороткими видеоимпульсами 0,1–1,0 нс при плотности потока от 2 до 5 Вт/см². Установлено, что снижение критериальных уровней поражения находится в прямой зависимости от увеличения длины волны воздействующего излучения, так как основной механизм пробоя связан с поглощением энергии квантов электромагнитного излучения, энергия которых прямо пропорциональна частоте излучения.

Ключевые слова: деградация, повреждение, интегральные микросхемы, радиоизлучение

Influence of Strong Electromagnetic Fields on Stability of Radioelectronic Components

V. G. Dmitriev, *Cand. Sci. (Engineering)*, *gejspheres@idg.chph.ru*

Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

A. I. Kupriyanov, *Dr. Sci. (Engineering)*, *Professor*, *aik125167@mail.ru*

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Yu. M. Perunov, *Dr. Sci. (Engineering)*, *Professor*, *gejspheres@idg.chph.ru*

Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper considers possible mechanisms causing degradation and catastrophic failures of microelectronic components in the fields of powerful electromagnetic radiation. The results of experimental studies and models used for analyzing damage mechanisms of modern integrated circuits under the action of radio emission are analyzed. Criterion levels of functional damage of semiconductor devices by very short video pulses of 0.1–1.0 ns at the flux density from 2 to 5 W/cm² are determined. It was found that the reduction in criterion damage levels is in direct correlation with the increase in wavelength of the influencing radiation, since the main breakdown mechanism is related to the absorption of energy of electromagnetic radiation quanta, the energy of which is directly proportional to radiation frequency.

Keywords: degradation, damage, integrated circuits, radio emission

Микроминиатюризация открыла значительные возможности развития и совершенствования радиоэлектронных систем (РЭС) различной структуры и функционального назначения. Но уменьшение технологического зазора, которое непременно предусматривает микроминиатюризация, усиливает опасность реализации угроз поражения элементной базы, а также угроз изменений характеристик элементов полупроводниковой электроники под действием сильных внешних электромагнитных воздействий. Такие воздействия оказывают сильные электромагнитные поля, обусловленные паразитными и непреднамеренными излучениями, сопровождающими работу приборов силовой электротехники и электроники, молниевые разряды, разряды статического электричества, а также излучениями, которые могут быть специально применены для функционального поражения радиоэлектронных систем и средств (поражения средствами электромагнитного оружия) [1].

Методы защиты от деструктивных воздействий сильных электромагнитных полей известны и в основном сводятся к экранированию защищаемых систем и устройств. Но для определения степени защищенности РЭС и для формирования требований к системам защиты необходимы оценки критических уровней электромагнитного излучения, поражающего приборы и устройств полупроводниковой электроники.

Ниже рассматриваются особенности определения уровня мощности импульсного электромагнитного излучения, приводящего к функциональному поражению РЭС [2].

Следует отметить, что к настоящему времени нет таких теоретических результатов исследований процессов в $p-n$ -переходах при воздействии на них мощными сигналами ЭМИ, которые в достаточной степени подтверждались экспериментальными результатами таких воздействий.

В [2] рассмотрены возможные причины функционального поражения РЭС, определены значения мощности электромагнитного излучения (ЭМИ), приводящего к перегрузке приемных устройств РЭС, т. е. превышению сигналом динамического диапазона этих приемных устройств. Предполагается, что вывод полупроводниковой электроники из строя возможен за счет полевого или теплового пробоя

на $p-n$ -переходе или на контакте металл-полупроводник. Предполагается также, что при воздействии СВЧ-излучения возможен нагрев в области $p-n$ -перехода до температур более $1400\text{ }^\circ\text{C}$, что приводит к изменению фазового состояния материала и разрушению $p-n$ -перехода, т. е. к необратимому выходу полупроводникового прибора из строя. Имеются оценки того, что для проявления эффектов даже полевого пробоя необходимы уровни мощности воздействующего излучения более 10^5 Вт/см^2 .

Вместе с тем проведенные в ряде работ [3, 5] экспериментальные исследования по определению критериальных уровней поражения радиоэлектронных средств сверхкороткими видеоимпульсами $0,1-1,0\text{ нс}$ показывают, что выход из строя электронной компонентной базы возможен уже при уровнях воздействия 1 Вт/см^2 , что не может быть причиной ни полевых, ни тем более тепловых пробоев в полупроводниках. В качестве критериев функционального поражения принимаются минимальные уровни мощности воздействующего излучения. Поэтому можно считать, что для интегральных микросхем эти уровни составляют в среднем от 2 до 5 Вт/см^2 . Такие уровни воздействия не могут быть причиной ни полевых, ни тем более тепловых пробоев в полупроводниках. Кроме того, снижение критериальных уровней поражения находится в прямой зависимости от увеличения длины волны воздействующего излучения, что также не отвечает предположению о возможности пробоев в полупроводниковых структурах, так как основной механизм пробоя связан с поглощением энергии квантов электромагнитного излучения, энергия которых прямо пропорциональна частоте излучения (рис. 1).

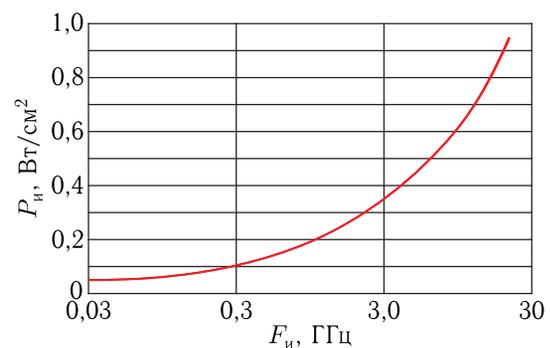


Рис. 1. Изменение удельной мощности функционального поражения от несущей частоты

Для обеспечения воздействия на полупроводниковые приборы импульс электромагнитного излучения (ЭМИ), сформированный в генерирующем устройстве, должен излучаться через антенну в направлении объекта воздействия. При этом видеосигнал дифференцируется, приобретая форму как на рис. 2 [6]. Такая форма импульса образуется в результате свертки сигнала, возбуждающего излучатель, с импульсной характеристикой этого излучателя.

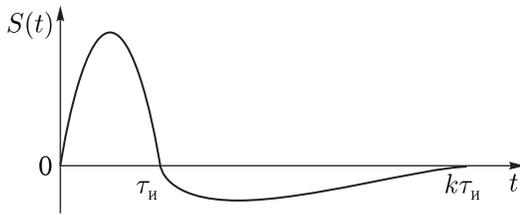


Рис. 2. Типичная форма сверхкороткого импульса

Аналитически импульс такой формы может быть аппроксимирован полиномиально-экспоненциальной зависимостью

$$S(t) = t(t - \tau_n)(t - k\tau_n) \exp(-\vartheta t) \text{rect}(t, k\tau_n), \quad (1)$$

где параметры k и ϑ обеспечивают выполнение условия $\int_0^{k\tau_n} S(t) dt = 0$, а срезающая функция

$$\text{rect}(t, k\tau_n) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \in [0; k\tau_n]; \\ 0 & \text{при } t < 0 \text{ и } t > k\tau_n. \end{cases} \quad (2)$$

Мощность генерируемого сигнала ЭМИ с последующим излучением в пространство распространения определяется как

$$P_s = \frac{E_s^2}{R_a} = \frac{E_{\text{сн}}^2}{2R_{\text{сн}}}, \quad (3)$$

где E_s — напряженность электрического поля в фидерном тракте генератора сигнала ЭМИ; $E_{\text{сн}}$ — напряженность электрического поля сигнала ЭМИ в пространстве распространения; R_a — сопротивление антенно-фидерного тракта генератора сигнала ЭМИ; $R_{\text{сн}}$ — сопротивление пространства распространения электромагнитного поля (для воздуха $120\pi \approx 377$ Ом).

При воздействии ЭМИ на объект (например, полупроводниковый прибор), находящийся на расстоянии D_0 от источника радиоизлучения, удельная

мощность воздействия P_0 в соответствии с (3) определяется соотношением

$$P_0 = \frac{P_n G_n}{4\pi D_0^2}, \quad (4)$$

где G_n — коэффициент усиления антенны источника радиоизлучения.

Используя выражения (3) и (4), можно найти действующее значение напряженности поля ЭМИ в месте размещения объекта воздействия:

$$E_d = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos \theta = \frac{E_n}{2D_0} \sqrt{\frac{G_n R_{\text{сн}}}{2\pi R_a}} \cos \theta, \quad (5)$$

где θ — угол отклонения от нормали к поверхности воздействующего электрическим полем объекта относительно вектора \mathbf{E} напряженности этого поля.

Удельная мощность электрического поля на объекте в соответствии с выражением (5) определяется:

$$P_0 = \frac{E_n^2 G_n}{8\pi D_0^2 R_a} \cos^2 \theta. \quad (6)$$

Из выражения (5) действующее значение напряженности электрического поля от дальности определяется:

$$E_d = \frac{1}{2D_0} \sqrt{\frac{P_n G_n R_{\text{сн}}}{2\pi R_a}} \cos \theta. \quad (7)$$

Из (6) и (7) следует, что вероятность поражения объекта воздействия будет зависеть от телесного угла полусферы θ от 0 до 180° положения этого объекта относительно вектора напряженности электрического поля:

$$p_E = \frac{1}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} - \cos \frac{\theta}{2} \right). \quad (8)$$

Так, при условии снижения уровня напряженности электрического поля в два раза вероятность воздействия на объект (на полупроводниковый прибор) определяется телесным углом при вершине 120° и составит примерно 0,1. Однако объекты воздействия являются составной частью устройств, модулей, блоков и систем, соединенных металлическими проводниками, что обеспечивает высокую вероятность поражения какого-либо объекта воздействия и, следовательно, функциональное поражение РЭС в целом.

Известно, что поверхность проводника, находящегося в диэлектрике, эквипотенциальна и потенциал этого проводника зависит от воздействующего электрического поля, которое может быть определено из выражений (5) и (7). При этом плотность зарядов на границе проводник–диэлектрик обратно пропорциональна площади проводника, находящегося в диэлектрике:

$$E_{\text{нд}} = \frac{E_{\text{сн}}}{S_{\text{п}}}, \quad (9)$$

где $S_{\text{п}}$ — площадь поверхности проводника в диэлектрике, равная $S_{\text{п}} = \pi dl$ (произведению длины окружности проводника с диаметром d на его длину l).

При воздействии электрическими полями на полупроводник, на поверхности которого имеются дефекты или дислокации, на границах этих дефектов и дислокаций происходит изменение напряженности электрического поля обратно пропорционально (как и для проводников) площади этих дефектов (дислокаций), что может приводить к нарушению работоспособности этого прибора.

На рис. 3 в качестве примера показана зависимость напряженности электрического поля на поверхности металлического проводника в диэлектрике от диаметра проводника. Длина проводника принята $l = 0,5$ см, что соответствует усредненным значениям длин проводников в микросхемах полупроводниковых приборов. Показанные на графике значения напряженности поля соответствуют тем,

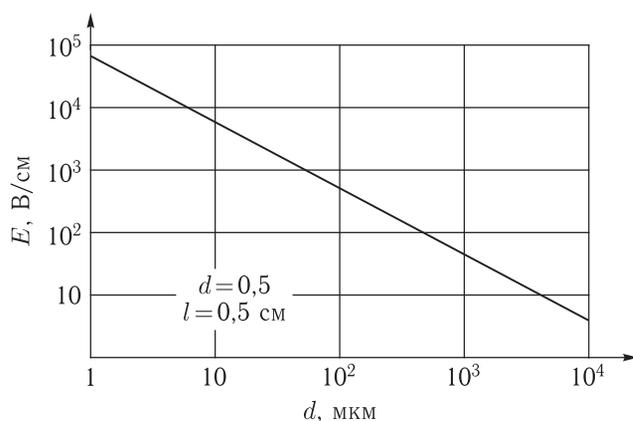


Рис. 3. Зависимость удельной напряженности электрического поля от диаметра проводника в диэлектрике при длине провода $l = 0,5$ см

которые возникают при воздействии на полупроводниковые приборы импульсным сигналом с удельной плотностью мощности 5 Вт/см^2 .

Таким образом, теоретически полученные соотношения и представленный на рис. 3 график показывают, что энергетический критерий функционального поражения полупроводниковой элементной базы определяется значением удельной плотности напряжения электрического поля на поверхности проводника в диэлектрике.

Кроме того, в соответствии с основами физики полупроводников [7] на границах дислокаций существуют оборванные или ненасыщенные связи, образование которых обусловлено нарушением периодичности атомной решетки в окрестности дислокации, вследствие чего дислокация заряжается. В материале p -типа дислокации оказывают донорное действие. В этом случае дислокация будет заряжена положительно. В материале n -типа дислокации оказывают акцепторное действие и дислокация будет заряжена отрицательно.

Под воздействием на полупроводник внешнего электромагнитного поля происходит изменение накопленных зарядов на дислокациях пропорционально изменению напряженности электрического поля, что приводит к изменению параметров p – n -перехода и, соответственно, меняет вольт-амперные характеристики приборов, прежде всего соотношение обратного и прямого сопротивлений диода, что в конечном счете приводит к нарушению работоспособности этого прибора.

Результаты теоретических исследований с высокой степенью достоверности подтверждаются экспериментальными исследованиями определения энергетических критериев функционального поражения полупроводников, в том числе:

- при увеличении рабочих частот РЭС уменьшаются габаритные размеры всех элементов монтажа, что, соответственно, приводит к снижению критериального уровня поражения этих приборов;
- при воздействии пачки импульсов происходит накопление напряжений на контактах «проводник в диэлектрике», а также на точечных дефектах и дислокациях кристаллической решетки полупроводников, что приводит к увеличению количества точечных дефектов и развитию дислокаций кристаллической решетки и, соответственно, к ухуд-

шению вольт-амперных характеристик полупроводников (прежде всего изменению соотношения обратного и прямого сопротивлений);

– аналогичные процессы происходят и при увеличении длительности воздействующих СВЧ-импульсов, которое также приводит к развитию дислокаций кристаллической решетки, что ухудшает параметры полупроводниковых приборов.

Следует отметить, что увеличение длительности наносекундных видеоимпульсов практически не приводит к развитию дислокаций кристаллической решетки. Поэтому эффективность воздействия видеоимпульсов зависит в основном от их амплитуды.

Значение удельной плотности напряженности электрического поля на поверхности проводника в диэлектрике, приводящее к функциональному поражению, согласно приведенным выше экспериментальным данным, составляет более 10 кВ/м (~ 5 Вт/см²) и практически не зависит от типа полупроводниковой ЭКБ. Удельная плотность напряженности электрического поля при воздействии электромагнитного импульса на конкретном элементе электронной компонентной базы определяется площадью поверхности проводника в полупроводнике и удельной мощностью сигнала электромагнитного излучения (ЭМИ).

Безусловно, каждый электромагнитный импульс при воздействии на объект несет квант энергии, значение которого определяется произведением действующего значения мощности сигнала на его длительность $\tau_{и}$:

$$W_{и} = P_{и} \tau_{и} = \frac{E_{ср}^2}{2R_{ср}} \tau_{и}. \quad (10)$$

Соотношение (10) показывает, что с увеличением длительности ЭМИ растет время воздействия и происходит некоторое снижение энергетического критерия функционального поражения. Аналогично к снижению критерия приводит последовательное воздействие N сигналов ЭМИ на объект воздействия. При этом энергия воздействия равна сумме энергий каждого импульса, что также приводит к снижению энергетического критерия функционального поражения. Это подтверждается экспериментально полученными графиками, представленными на рис. 1 и рис. 3.

Из (10), а также графика на рис. 3, можно определить, что при длительности 1 нс и удельной

мощности сигнала 5 Вт/см² энергия воздействия составит $5 \cdot 10^{-9}$ Дж. Это значение энергии полностью исключает возможность функционального поражения за счет теплового нагрева поражаемого объекта.

Зависимость критерия функционального поражения от несущей частоты сигналов СВЧ ЭМИ также определяется изменением длительности поражающего импульса от частоты первой гармоники:

$$\tau_{и} \approx \frac{2}{F_b}. \quad (11)$$

Полученный вывод также подтверждается экспериментальными данными, которые иллюстрируются графиком рис. 3.

В зависимости от значений уровня воздействующей мощности (или напряженности электрического поля) в полупроводниковых приборах проявляются следующие процессы:

- полное функциональное поражение полупроводников без восстановления работоспособности после воздействия;
- функциональное поражение полупроводников с последующим восстановлением работоспособности после прекращения воздействия, но со сниженными характеристиками (время восстановления от одного до десятка часов);
- частичное функциональное поражение, характеризующееся снижением вольт-амперных характеристик приборов с последующим частичным восстановлением до штатных значений.

Возникновение того или иного уровня поражения определяется уровнями напряженности электрического поля, возникающего при воздействии ЭМИ на границе проводник–диэлектрик.

При очень высоких уровнях напряженности электрического поля на поверхности проводника в диэлектрике возникает полное разрушение кристаллической решетки материала полупроводниковых компонентов в районах p - n -переходов и, соответственно, функциональное их поражение.

При средних значениях напряженности электрического поля (ниже уровня пробивного напряжения) в полупроводнике возникают дополнительные точечные дефекты и дислокации кристаллической решетки, снижающие крутизну вольт-амперных характеристик прибора. Время и уровень

восстановления нарушений кристаллической решетки определяется глубиной деформации и приводит лишь к частичному восстановлению технических характеристик прибора.

В случае низких значений ЭМИ возникающие дефекты незначительны, как и изменения характеристик полупроводниковых приборов. Такие изменения характеристик возникают только во время воздействия на полупроводник импульсным излучением. Исключения составляют воздействие сигналов ЭМИ наносекундной длительности на цифровые устройства, для которых ЭМИ создают импульсные наводки в информационных шинах. Внедрения наведенных импульсов в информационные пакеты РЭС с высокой вероятностью приводят к сбоям, прекращению штатной работы цифровых устройств и необходимости соответствующей перезагрузки вычислительных средств.

Принудительный перезапуск или переустановка программного обеспечения приводит к восстановлению работоспособности пораженного радиоэлектронного устройства. Эти эффекты неоднократно наблюдались при проведении экспериментов по воздействию сверхкороткими импульсами (менее 1 нс) на квадрокоптеры, проводимых на базе ОИВТ РАН (протоколы испытаний от 19.05.2017 г. и от 16.06.2017 г.). Дальность поражения квадрокоптеров составляла 15–20 м, что соответствовало удельной мощности излучения на поражаемом объекте от 4 до 8 Вт/см². На такой дальности квадрокоптеры теряли управление и падали. Однако после перезагрузки программного обеспечения они восстанавливали свои функциональные возможности.

Из выражений (10) и (11) следует, что для эффективного функционального поражения полупроводниковой компонентной базы необходимо обеспечивать требуемые значения удельной мощности ЭМИ $P_{и}$ или напряженности электрического поля $E_{и}$, которые определяются уровнями излучения генераторов сигналов ЭМИ и дальностью до поражаемого объекта D_0 . При этом значение энергетического потенциала станции функционального поражения как произведение мощности излучения передатчика $P_{и}$ на коэффициент усиления передающей антенны $G_{и}$ определяется:

$$P_{и}G_{и} = 4\pi P_0 D_0^2. \quad (12)$$

График значений энергетического потенциала станции функционального поражения от дальности до РЭС при условии реализации критерия поражения от 1 до 20 Вт/см² одним импульсом ЭМИ длительностью 1 нс показан на рис. 4.

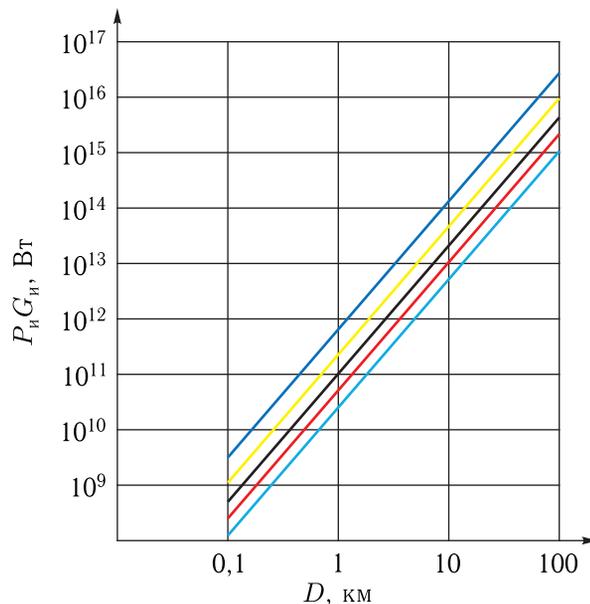


Рис. 4. Зависимость энергетического потенциала станции функционального поражения от дальности

Из тактических соображений желательно, чтобы станция функционального поражения обеспечивала поражение РЭС на расстоянии ≥ 10 км. При условии, что плотность мощности на входе поражаемого объекта должна быть $P_0 = (2-5)$ Вт/см², энергетический потенциал станции ФП должен составить более 10^{13} Вт.

Значения генерируемой передатчиком станции функционального поражения мощности и напряженности электрического поля сигналов ЭМИ, таким образом, составят:

$$P_{и} = \frac{4\pi P_0 D_0^2}{G_{и}} \quad \text{и} \quad E_{и} = 2E_0 D_0 \sqrt{\frac{\pi R_{ср}}{G_{и} R_{п}}}. \quad (13)$$

В соответствии с рис. 4 и выражениями (13) видно, что для поражения объектов даже на расстоянии 1 км необходимо получить очень большие уровни мощности (напряжения электрического поля), что технически вполне реализуемо при создании специальных генераторов и методов формирования такого уровня сигналов.

Выводы. Для повышения устойчивости полупроводниковой электронной компонентной базы при воздействии импульсов наносекундной длительности необходимо использовать полупроводники с минимальным количеством дефектов и дислокаций кристаллической решетки, что зависит от технологии выращивания кристаллов и практически не меняется со временем. Поэтому основная задача — совершенствование технологии производства кристаллов полупроводников или выбор из имеющихся технологий тех, которые обеспечивают минимальное число дефектов кристаллической структуры.

Если невозможно использовать первое условие — необходимо использовать те микросхемы, которые при одинаковых технических характеристиках имеют минимальную плотность монтажа элементов.

Список литературы

1. Космическое оружие: дилемма безопасности. Под ред. Е. П. Велихова, Р. З. Сагдеева, А. А. Кокошина. М.: Мир, 1986. 182 с.
2. Добыкин В. Д., Куприянов В. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. Под ред. А. И. Куприянова. М.: Вузовская книга, 2007. 468 с.
3. Быстров Р. П., Дмитриев В. Г., Перунов Ю. М. Использование средств радиоэлектронной борьбы для снижения боевых возможностей беспилотных летательных аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники, 2014, № 1. С. 15–23.
4. Дмитриев В. Г. Радиоэлектронная борьба: функциональное поражение радиоэлектронных систем и средств: М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 268 с.
5. Корнев А. Н. Экспериментальная оценка устойчивости телекоммуникационных сетей при деструктивном воздействии сверхкороткого электромагнитного излучения. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2010. 126 с.
6. Сверхширокополосные импульсные радиосистемы. Под. ред. В. И. Кошелева. Новосибирск: Наука, 2015. 483 с.
7. Битюцкая Л. А., Богатиков Е. В., Шебанов А. Н. Металлографическое изучение полупроводников. Учеб.-метод. пособ. Воронеж: ВГУ, 2013. 34 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 01.03.2023
Дата принятия рукописи
в печать 26.05.2023