

УДК 59.13.15

## **ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ**

**В. И. Иванов**

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

Рассмотрены особенности процессов взаимодействия электронов, гамма-излучения, ионов с твердым телом с точки зрения использования их в технологических процессах производства электровакуумных приборов (ЭВП). С учетом специфики производства ЭВП определены перспективные направления исследований и разработок технологических процессов на базе высокоинтенсивных ионизирующих излучений.

Прогресс в технике связан с созданием новых вычислительных технологий. К ним относятся технологические процессы, базирующиеся на использовании потоков высокоинтенсивных ионизирующих излучений (ВИИ): электронов, ионов, гамма-излучения, излучения лазеров. ВИИ, взаимодействуя с твердым телом, нарушают его кристаллическую решетку и электронную структуру, вызывают многочисленные вторичные эффекты, которые приводят к изменению физических и химических свойств твердого тела, а также меняют протекание многих физико-химических процессов.

Круг решаемых технических задач с помощью ВИИ постоянно расширяется и в настоящее время охватывает многие сферы человеческой деятельности: медицину, сельское хозяйство, космос, технику и т. д. Наибольшее практическое применение ВИИ нашли в электронной технике. Это связано с тем, что в изделиях электроны, ионы, излучения лазеров являются основой функционирования, включая генераторы и ускорители данных видов ВИИ, что способствует решению технических проблем и снижению психологической адаптации при создании на их базе технологических процессов. Однако в производстве электровакуумных приборов (ЭВП) использование ВИИ ограничено из-за отсутствия физических основ проектирования и создания технологических процессов и оборудования для конкретных задач.

Многообразие используемых в электровакуумной промышленности материалов, технологических операций и процессов открывает большие возможности применения ВИИ при изготовлении ЭВП и для решения частных научных задач в целях стабилизации и улучшения характеристик и параметров приборов.

При создании технологического процесса на основе ВИИ необходимо использовать оптимальный вид и источник ВИИ. При этом приходится учитывать многие факторы, часто противоположные друг другу:

отсутствие остаточной радиоактивности в облучаемых объектах;

выбранный вид ВИИ должен обладать в отдельных случаях высокой проникающей способностью для равномерного распределения воздействия по толщине объекта. В других случаях ВИИ должно обладать изотропностью поглощения для создания концентрированного воздействия на определенной глубине;

воздействие ВИИ в некоторых случаях не должно сопровождаться макроразогревом объекта.

Эксплуатацию источника ВИИ желательно свести к операциям, навыки проведения которых хорошо известны в данной отрасли промышленности. Это снизит стоимость установки оборудования, обучения обслуживающего персонала, обеспечит требования техники безопасности, сократит время для преодоления психологического барьера.

Учитывая требование по остаточной радиоактивности, верхний энергетический диапазон электронов, ионов, гамма-излучения, применяемых в промышленных технологических процессах, ограничен 10 МэВ и определяется порогом образования долгоживущей наведенной радиоактивности в облучаемых объектах. Нижний энергетический предел не имеет ограничений.

Общие закономерности процессов взаимодействия данных видов ВИИ с твердым телом достаточно хорошо изучены [1]. Широкое промышленное применение находят процессы, основанные на термическом воздействии ВИИ (нагрев, плавка, испарение). Значительно меньшее применение нашли нетермические процессы взаимодействия ВИИ, влияющие на стимуляцию химических реакций в результате ионизации и возбуждения атомов твердого тела, на физические и химические свойства твердого тела в результате дефектообразования при упругом соударении.

При выборе вида ВИИ для конкретных целей необходимо учитывать особенности процессов их взаимодействия с твердым телом.

#### *Электроны с энергией до 10 МэВ.*

1. Электроны являются носителями только энергии и заряда, не изменяют элементного состава облучаемого объекта.

2. Преобладают ионизационные потери энергии. Для оценки величины вклада ионизационных и радиационных потерь (тормозное излучение) Бете и Гайтлер дают зависимость [2]:

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_R}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_i} \approx \frac{E_e Z}{1600 m_0 c^2},$$

где  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_R$  — радиационные потери;

$\left(\frac{dE}{dx}\right)_i$  — ионизационные потери;

$E_e$  — энергия электронов, эВ;

$Z$  — атомный номер вещества;

$m_0$  — масса электрона, кг;

$c$  — скорость света, м/с.

Приведем для различных металлов величины энергии электронов ( $E_e'$ ), когда радиационные и ионизационные потери равны:

$$E_e' \approx \frac{800}{Z}, \text{ МэВ.}$$

Для металлов Cu, Fe, Al, Mo, Ti, W значения  $E_e'$  равны соответственно 27,6; 30,8; 61,5; 19; 36,3; 10,8 МэВ.

Величина радиационных потерь энергии электронов дает возможность оценить параметры тормозного гамма-излучения при использовании ускорителей электронов и определить оптимальные условия конвертирования электронного потока на гамма-мишенях, которые зависят от материала мишени, энергии и интенсивности потока электронов [3].

3. Средняя длина пробега электронов зависит от энергии и материала мишени. Существуют эмпирические формулы, позволяющие определить средний пробег электронов [4].

Для энергии  $E_e > 0,8$  МэВ:

$$R = \frac{0,542E_e - 0,133}{\rho},$$

где  $R$  — средняя длина пробега, см;

$\rho$  — плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>.

Величины пробегов  $R$  электронов с  $E_e = 5$  МэВ для металлов Cu, Fe, Al, Mo, W, Ni, Ti равны соответственно 0,288; 0,34; 0,95; 0,252; 0,133; 0,29; 0,57 см.

Таким образом, вся энергия потока электронов поглощается в небольшом слое. Это дает возможность концентрировать значительные дозы энергии в определенном объеме вещества за относительно короткое время, но ограничивает применение электронов для облучения массивных объектов.

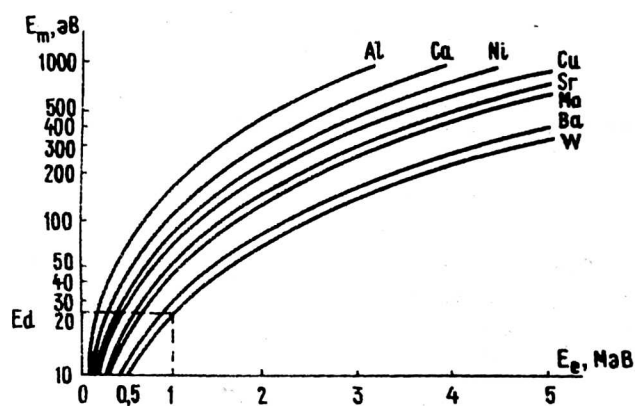
4. Для релятивистских электронов ( $E_e > m_0 c^2$ ) переданная энергия может быть достаточной для выбивания атома из узла кристаллической решетки. Атом смещается, если он приобрел энергию  $E_a$ , которая больше "пороговой энергии"  $E_d$  ( $E_d = 25$  эВ).

Максимальная энергия ( $E_m$ ), переданная атому, определяется выражением

$$E_m = \frac{2E_e(E_e + 2m_0 c^2)}{Mc^2}, \text{ эВ,}$$

где  $M$  — масса атома.

На рисунке приведены значения  $E_m$ , передаваемых атомам различных элементов электронами при упругих взаимодействиях.



Значения  $E_m$  для различных элементов

Каном, с учетом теории Кинчина и Пиза, показано, что электрон с энергией 0,5—8 МэВ создаст один смещенный атом в твердых телах с  $Z$  от 10 до 80 [5].

Таким образом, число смещенных атомов равно числу поглощенных электронов, что позволяет контролировать количество введенных дефектов в металлах. В ионных кристаллах возможны другие механизмы оборудования точечных дефектов: за счет энергии электронного возбуждения [6], многократной ионизации [7], образования парных дефектов типа “смещенный ион — электрон” [8]. Следует отметить, что процессы образования радиационных дефектов до конца не выяснены, особенно в ионных кристаллах [9].

**Гамма-излучение с  $E_\gamma$  до 10 МэВ.** Гамма-излучение может терять свою энергию в твердом теле в результате трех процессов: фотоэлектрического эффекта, Комpton-эффекта и эффекта образования пар [10]. В диапазоне энергий 0,5—10 МэВ преобладает механизм Комpton-эффекта, характеризующийся передачей части энергии от падающего гамма-кванта электрону вещества — электрону отдачи, а оставшейся части энергии — фотону рассеяния с увеличенной длиной волны.

Энергия электрона отдачи равна:

$$E_{\max} = h\nu_0 - h\nu'_{\min}$$

где  $h\nu$  — энергия падающего кванта;

$h\nu'_{\min}$  — энергия рассеянного фотона.

В зависимости от условий взаимодействия электрон отдачи может иметь значительные энергии и вызывать эффекты в твердом теле, которые рассмотрены выше [10], т. е. происходит как бы внутреннее облучение вещества электронами с высокой энергией (таблица).

Средняя энергия электрона отдачи в зависимости от энергии гамма-кванта

Энергия гамма-кванта, МэВ	0,1	0,5	1,0	5,0	10,0
Средняя энергия электрона отдачи, МэВ	0,014	0,17	0,44	3,14	6,8

Большая глубина проникновения гамма-излучения позволяет облучать массивные образцы.

*Ионы с энергией до 10 МэВ.* Особенность взаимодействия ионов с твердым телом, кроме изменения энергетического и зарядового состояний, может приводить к изменению элементного состава. Поэтому результаты воздействия ионов многообразнее, и ионы как технологический инструмент более универсальны, чем электроны.

Технологические процессы с использованием ионов можно разделить на два класса:

получение пленок за счет осаждения из молекулярных и ионных пучков;

обработка поверхности с использованием процессов, вызванных упругим взаимодействием ионов с атомами вещества, которые приводят к дефектообразованию, распылению, легированию, перемешиванию. Ионы с энергиями более 0,5 кэВ передают атомам энергию, значительно превышающую "пороговую" ( $E_a > E_d$ ), что приводит к развитию каскада соударений. В результате образуется область высокой концентрации вакансий и межузельных атомов. Число смещенных атомов наиболее просто оценивается в модели упругих шаров [11]:

$$N(E) = \frac{E_0}{2E_d},$$

где  $E_0$  — энергия первичного иона.

В каскаде атом-атомных соударений происходят массоперенос за счет температурных полей, что придает переносу диффузионный характер, и перемешивания, обусловленные смещающими и замещающими столкновениями. Толщина слоя, в пределах которого происходит массоперенос (перемешивание), составляет:

$$L \approx \sqrt{4(D_{к.п} + D_T) t},$$

где  $t$  — продолжительность облучения;

$D_{к.п}$  — коэффициент динамического каскадного перемешивания;

$D_T$  — коэффициент диффузии, обусловленный рациональным разогревом.

В промышленности наибольшее применение нашли источники электронов, ионов, гамма-излучения машинного типа:

электронные ускорители, генерирующие потоки электронов и тормозное гамма-излучение в атмосферу с энергиями от сотен кэВ до 10 МэВ;

электронно-лучевые установки с ускоряющим напряжением до 200 эВ без вывода в атмосферу;

ионные ускорители с энергией до 10 МэВ без вывода ионов в атмосферу;

ионные источники с энергией до десятков кэВ без вывода ионов в атмосферу.

Успешное внедрение и эффективность использования ВИИ, а также рентабельность технологии значительно повышаются при создании технологического комплекса для конкретного технологического процесса. При этом каждый комплекс должен включать в себя: источник ВИИ; устройство, обеспечивающее непрерывность процесса облучения (транспортные ленты, загрузочно-разгрузочные устройства и т. д.), дозиметрическую и контролируемую аппаратуру с программным управлением, вакуумные системы, биологическую защиту и т. д. Технические требования к технологическому комплексу определяются задачами конкретного технологического процесса.

С каждым годом к ЭВП предъявляются все более высокие требования по параметрам, надежности и сроку службы. Часто эти требования настолько жестки, что с позиций традиционной технологии производства приборов их можно достичь только ценою значительного удорожания при невысоком проценте выхода годных и

малом сроке службы прибора. При разнообразии операций: металлозаготовительные, стекло- и керамикоизготовительные, изготовление деталей и узлов методом порошковой металлургии, формирование сварных и паяных переходов, создание вакуума, изготовление и обработка катодов различных типов, получение различных покрытий и т. д. — при большом числе факторов, влияющих на течение этих операций, следует выделить характерные особенности приборной технологии, а именно:

энергия для проведения большинства операций сообщается в виде тепла;  
значительное место занимают различные физико-химические превращения по схеме разложения твердых веществ:



степень совпадения характеристик ЭВП зависит от сопоставимости условий проведения каждой из технологических операций.

Необходимо подчеркнуть, что в технологии изготовления ЭВП присутствует много труднорегулируемых параметров течения процессов (формирование остаточной газовой атмосферы, активирование катода и т. д.). Использование ВИИ как определяющего фактора в технологических процессах является полезным. Назрела необходимость замены традиционных методов теплового воздействия на ход многих физико-химических технологических процессов квантово-карпускулярными способами передачи энергии.

Опираясь на возможности радиационной техники и физики ионизирующих излучений, а также основываясь на полученные результаты ряда авторов и собственные исследования, можно с достаточной уверенностью назвать некоторые перспективные направления в области использования ВИИ в процессах производства ЭВП:

формирование эмиссионных покрытий катодов за счет воздействия на физико-химические превращения в катодных материалах;

создание различных технологических покрытий с повышенной адгезией с использованием процессов имплантации и ионного перемешивания;

диффузионная сварка как активирующий фактор в целях улучшения качества вакуумно-плотных соединений;

глубокое обезгаживание узлов и деталей ЭВП за счет интенсификации процесса десорбции частиц газа с поверхности и объема;

модификация конструкционных материалов ЭВП (металлов, полимерных материалов и др.);

изготовление стеклянных и керамических узлов, качество продукции из которых определяется степенью разложения сырьевых материалов, мелкозернистостью исходного материала, способностью к перемешиванию за счет усиления диффузионных процессов;

отверждение лакокрасочных покрытий приборов.

## Литература

1. *Лейман К.* Взаимодействие излучения с твердым телом и образование элементарных дефектов/ Пер. с англ. канд. физ.-мат. наук Г. И. Бабкина. — М.: Атомиздат, 1979. С. 293.
2. *Bethe H., Heitler W.* Proc. Roy. Soc. Lond, 1934. VA 146. P. 83.
3. *Быховский А. В., Ларичев А. В., Чистов Е. Д.* Вопросы защиты от ионизирующих излучений в радиационной химии. — М.: Атомиздат, 1970. С. 280.
4. *Шиллер З., Гайзич У., Панцер З.* Электронно-лучевая технология/ Пер. с нем. — М.: Энергия, 1980. С. 528.
5. *Томпсон М.* Дефекты и радиационные повреждения в металлах/ Пер. с англ. под ред. В. Е. Юрасовой. — М.: Мир, 1971. С. 368.

6. *Seit F.* // *Revs. Modern Phys.* 1954. V. 26. № 1.
7. *Warley H. O., Warley J. H.* // *J. Nature.* 1954. V. 174. P. 886.
8. *Винецкий В. Л.* Радиационная физика неметаллических кристаллов. — Киев: Наук. думка, 1967. С. 25—29.
9. *Спицин В. И., Громов В. В.* Физ.-хим. свойства радиоактивных твердых тел. — М.: Атомиздат, 1973. С. 192.
10. *Прайс Б., Хортон К., Спинни К.* Защита от ядерных излучений/ Пер. с англ. под ред. канд. физ.-мат. наук С. Г. Цыпина. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959. С. 490.
11. *Буренков А. Ф., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Темкин М. М.* Пространственное распределение энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах. — М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 248.

## HIGH EXTENSIVE TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF EVE

V. I. Ivanov

Moscow Institute of Radio Engineering, Electronic and Automation, Moscow, Russia

The special features of the processes electron,  $\gamma$ - and Ionic radiation Interaction with solid have been observed in view of application for production EVE. As result there have been indicated the perspective directions of the investigations and technology on base high extensive ionization processes.