

УДК 537.311

## **Vis-NIR ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК АМОРФНОГО ГЕРМАНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ a-Ge/p-Si, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИМПУЛЬСНОГО ОСАЖДЕНИЯ**

К.Э. АВДЖЯН, Л.А. МАТЕВОСЯН, А.Ю. МКРТЧЯН, А.М. ХАЧАТРЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 27 декабря 2011 г.)

Исследованы оптические свойства пленок аморфного германия a-Ge (подложка – стекло) и электрические свойства гетероструктуры a-Ge/p-Si, полученных методом лазерно-импульсного осаждения. Показано, что оптические свойства пленок a-Ge хорошо объясняются моделью Тауца для аморфного полупроводника. Установлена зависимость оптической щели пленок a-Ge от их толщины. При прямых смещениях ВАХ гетероструктуры a-Ge/p-Si удовлетворительно аппроксимируется соотношением для плотности тока  $J = CV^m$ , где  $m$  меняется от 1.45 до 1.95 в зависимости от приложенного прямого смещения и от толщины пленки a-Ge. Для гетероструктуры a-Ge/p-Si (толщина пленки a-Ge – 400 нм) наблюдается почти квадратичная зависимость плотности тока, что указывает на преобладание тока, ограниченного объемным зарядом.

### **1. Введение**

Пленки аморфных полупроводников и структур на их основе имеют большое практическое применение в качестве оптических и фотоэлектрических материалов. Преимуществом аморфных полупроводников является простота их получения в совокупности с более широкой материальной базой и большими площадями их нанесения. Перспективы практического применения стимулировали большое количество экспериментальных работ по исследованию физических свойств аморфных полупроводников. Среди этих исследований значительное место занимают работы по аморфному германию и кремнию, полученных в основном равновесными методами осаждения (испарение в вакууме, электронно-лучевое осаждение и т.д.) на различных подложках [1-3]. Из этих работ стало ясно, что свойства аморфных пленок являются структурно чувствительными и существует четкая взаимосвязь: технология получения – структура – свойства. Эти работы позволили разделить “собственные” и “несобственные” свойства аморфных материалов и ввести, по аналогии с кристаллическими полупроводниками, понятие “идеального” аморфного материала [4]. Исследования физических свойств аморфных пленок в зависимости от технологических условий получения важны также и с физической точки зрения, так как позволяют определить условия получения пленок, близких по свойствам к “идеальному” аморф-

ному состоянию, исследование которых облегчает разработку теоретических представлений об аморфном состоянии в целом.

Применение гетероструктур аморфный полупроводник/кристаллический кремний (с-Si) позволяет совместить высокую эффективность с-Si с низкой стоимостью получения аморфного полупроводника. Однако практическая реализация приборов на их основе затруднена из-за того, что существует широкий набор параметров, чувствительных к технологии получения аморфных пленок (ширина щели подвижности, плотность состояний дефектов и т.д.) и отсутствуют ясные представления о закономерностях формирования гетероструктур аморфный/кристаллический полупроводник.

Развитие электроники стимулирует также изучение возможностей получения аморфных пленок полупроводников и структур на их основе в нетривиальных условиях, к которым относятся, в частности, резко неравновесные условия роста пленок, достигаемые при методе лазерно-импульсного осаждения [5,6].

В данной работе приведены результаты исследования оптических характеристик аморфных пленок германия (подложка – стекло) и электрических свойств гетероструктуры (ГС) а-Ge/*p*-Si, полученных при комнатной температуре методом вакуумного лазерно-импульсного осаждения из чистой германиевой мишени.

## 2. Методика эксперимента

Пленки а-Ge (толщина 25–450 нм) получены на стеклянных и кремниевых подложках *p*-типа (заводская обработка,  $\rho > 10^4$  Ом см) при комнатной температуре методом вакуумного ( $3 \times 10^{-6}$  мм рт. ст.) лазерно-импульсного (длина волны 1.064 мкм, длительность импульса 30 нс, энергия 3 Дж и интенсивность в зоне облучения мишени  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) осаждения из чистой Ge мишени. Отбор кремниевых пластин (естественный окисел не более 3–4 нм) был проведен на тонкопленочной измерительной системе Filmetrics F20. После этого как кремниевые, так и стеклянные подложки обезжиривались в чистом ацетоне, промывались в бидистиллированной воде и сушились под струей сжатого воздуха. Кратковременный (20–30 мин) отжиг подложек был произведен при температуре 100°C и при вакууме  $3 \times 10^{-6}$  мм рт. ст. до осаждения слоев Ge. Низкоомные контакты к ГС а-Ge/*p*-Si получались лазерным осаждением индия (интенсивность в зоне облучения мишени  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>). Кристаллическая структура пленок исследовалась методом дифракции электронов высокой энергии в режиме отражения (ускоряющее напряжение – 75 кВ) на электронографе ЭМР-100М. Толщина пленок а-Ge измерялась методом оптической интерференции. На спектрометре Filmetrics F20 (диапазон длин волн 400–1000 нм) были проведены независимые измерения коэффициентов пропускания (*T*) и отражения (*R*). Частотная зависимость коэффициента поглощения слоев а-Ge определялась на основе этих данных. Электрические свойства ГС а-Ge/*p*-Si изучались по темновой вольт-амперной характеристике (ВАХ), измеренной при комнатной температуре.

### 3. Результаты эксперимента и их обсуждение

#### 3.1. Характеристика процесса лазерно-импульсного осаждения

Характер взаимодействия лазерного излучения с поверхностью мишени, зависящий от плотности потока энергии, длительности и длины волны излучения, полностью определяет физическое состояние разлетающихся в вакууме частиц: энергетический спектр, диаграмму разлета и их количество. При использовании наносекундных ( $\sim 3 \times 10^{-8}$  с) лазеров с длиной волны излучения 1.06 мкм и интенсивностью в зоне облучения мишени  $10^8$ – $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>, процесс осаждения характеризуется наличием плотного ( $10^{13}$ – $10^{14}$  атом/см<sup>2</sup> за импульс) потока частиц, большая доля которых находится в ионизированном состоянии (плотная лазерная плазма). В этом случае осаждение пленок происходит в весьма неравновесных условиях. Короткое же время осаждения ( $\sim 10^{-6}$  сек) обеспечивает большую чистоту полученных наноразмерных структур при сравнительно невысоком вакууме. В случае лазерного осаждения импульсами наносекундной длительности имеют место скорости осаждения  $\sim 1$ – $2$  нм за импульс. Такая толщина соответствует поступлению на 1 см<sup>2</sup>  $\sim 10^{15}$  атомов осаждаемого вещества. При вакууме  $3 \times 10^{-6}$  мм рт. ст., за время поступления конденсата  $\sim 10^{-6}$  сек, подложка подвергается бомбардировке молекулами остаточного газа интенсивностью  $\sim 10^9$  см<sup>-2</sup>. Максимальное содержание примесей, обусловленных остаточными газами, в этом случае будет  $10^9$  атомов в пленке с площадью 1 см<sup>2</sup> и толщиной в 1–2 нм. В процентном отношении такое количество атомов остаточного газа составляет  $10^{-4}\%$  атомов основного вещества, что равносильно условиям осаждения вакуума  $10^{-11}$  мм рт. ст. и скорости роста 0.1–1 нм/сек, которые типичны для метода молекулярно-лучевой эпитаксии и являются предельно чистыми условиями вакуумного осаждения.

Пленки а-Ge и ГС а-Ge/*p*-Si нами были изготовлены в неравновесных и чистых условиях процесса вакуумного осаждения в соответствии с вышесказанным.

#### 3.2. Структура и оптические характеристики пленок а-Ge

Из электронно-дифракционных исследований установлено, что пленки германия, осажденные при комнатной температуре как на кремниевой, так и на стеклянной подложке, имеют аморфную структуру вне зависимости от их толщины.

Оптические свойства осажденных на стеклянные подложки пленок а-Ge (толщина 25–450 нм) исследовались в диапазоне длин волн 400–1000 нм (Vis-NIR) (при меньших толщинах увеличивается погрешность эксперимента из-за слабого поглощения). Проведены независимые измерения  $T$  и  $R$  при нормальном падении света. На рис.1 показана частотная зависимость поглощения ( $A = 1 - R - T$ ) пленок а-Ge для различных толщин. Частотная зависимость коэффициента поглощения ( $\alpha$ ) определена с помощью известной формулы  $T = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} / (1 - R^2 e^{-2\alpha d})$  [7].

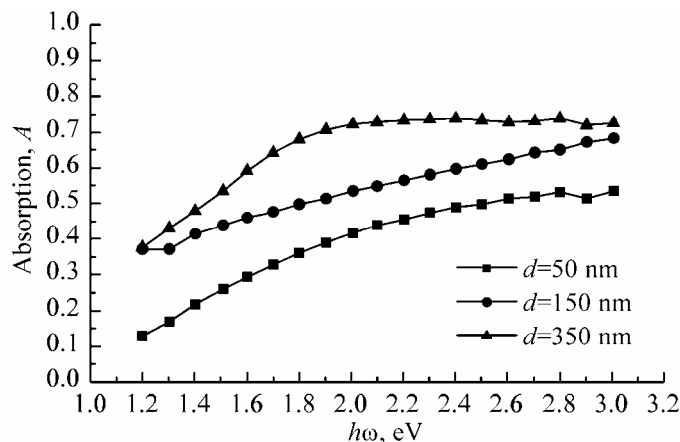


Рис.1. Частотная зависимость поглощения ( $A = 1 - R - T$ ) пленок a-Ge для различных толщин.

Оптические свойства как аморфных, так и кристаллических полупроводников могут быть полностью выведены из общего одноэлектронного выражения для мнимой части диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2(\omega)$  [4]. В кристалле поведение  $\epsilon_2(\omega)$  определяется требованием сохранения импульса в оптических переходах. Характерной же для аморфных полупроводников особенностью, обусловленной нарушением правила сохранения импульса, является квадратичная зависимость края поглощения от энергии фотонов.

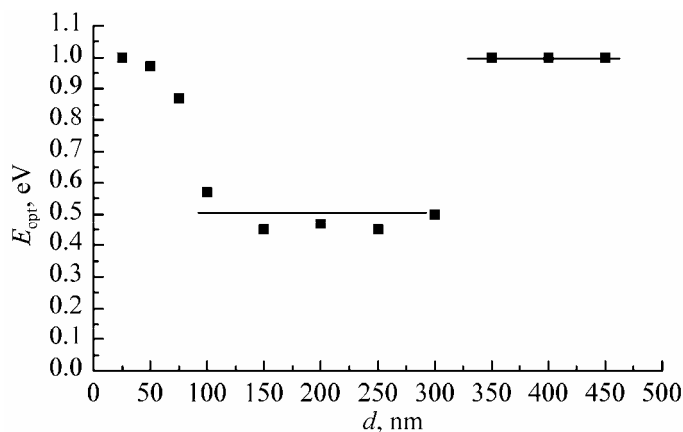


Рис.2. Зависимость оптической ширины “запрещенной” зоны пленок a-Ge от толщины.

Оптические свойства полностью координированного (изотропного) вещества впервые были проанализированы Тауцом и др [8]. В предположении параболичности зон, частотная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости  $\epsilon_2(\omega)$  для изотропной аморфной среды принимает следующий вид:  $\omega^2 \epsilon_2(\omega) = B(h\omega - E_{opt})^2$ , где  $E_{opt}$  есть разность края подвижности валентной

зоны и зоны проводимости (оптическая щель по Тауцу). Используя понятия коэффициента преломления ( $n$ ) и экстинкции ( $k$ ), вводимые при взаимодействии электромагнитной волны с изотропной средой, а также соотношения, связывающие различные оптические функции:  $\varepsilon_2 = 2nk$ ,  $\alpha = 4\pi k/\lambda$ , и учитывая полученные нами экспериментальные данные для  $\alpha$ , были вычислены частотные зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2(\omega)$ . Из графических зависимостей  $(\omega^2 \varepsilon_2(\omega))^{1/2}$  от  $h\omega$  найдена оптическая щель по Тауцу – ( $E_{\text{opt}}$ ). На рис.2 представлена зависимость оптической ширины “запрещенной” зоны пленок а-Ge от толщины.

Из рис.2 видно, что имеются две области, где  $E_{\text{opt}}$  не зависит от толщины пленок. Наличие высокой концентрации локализованных состояний в “запрещенной” зоне несет ответственность за низкое значение  $E_{\text{opt}}$  для толщин 100–300 нм. Более толстые пленки характеризуются более однородной сетью связей Ge, что сводит к минимуму количество дефектов и локализованные состояния в “запрещенной” зоне (почти “идеальное” аморфное состояние). При

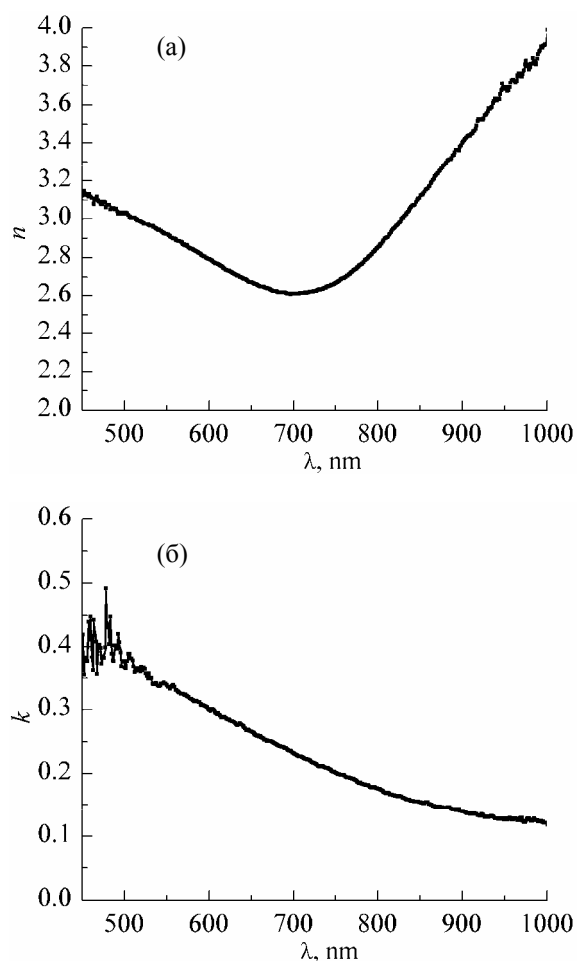


Рис.3. Дисперсия  $n$  (а) и  $k$  (б) для пленки а-Ge толщиной 400 нм.

уменьшении толщины пленки ( $<100$  нм) наблюдается увеличение  $E_{\text{opt}}$ , что объясняется увеличением влияния естественного окисления пленок. Полученный нами результат для толщин 350–450 нм находится в согласии с работой Тауца и др. ( $E_{\text{opt}} \sim 0.9$  эВ) [8], где пленки a-Ge были получены в равновесных условиях роста. На рис.3 приведены зависимости от длины волны вычисленных  $n$  и  $k$  для пленки a-Ge толщиной 400 нм.

### 3.3. Электрические свойства гетероструктуры a-Ge/p-Si

Электрические свойства ГС a-Ge/p-Si изучены по статической темновой ВАХ, измеренной при комнатной температуре. На рис.4 приведены зависимости логарифма плотности тока ( $\ln J$ ) от приложенного внешнего смещения для ГС a-Ge/p-Si при различных толщинах пленок a-Ge. Толщины пленок a-Ge при изготовлении ГС a-Ge/p-S были выбраны, исходя из толщинной зависимости оптической щели пленок a-Ge (рис.2).

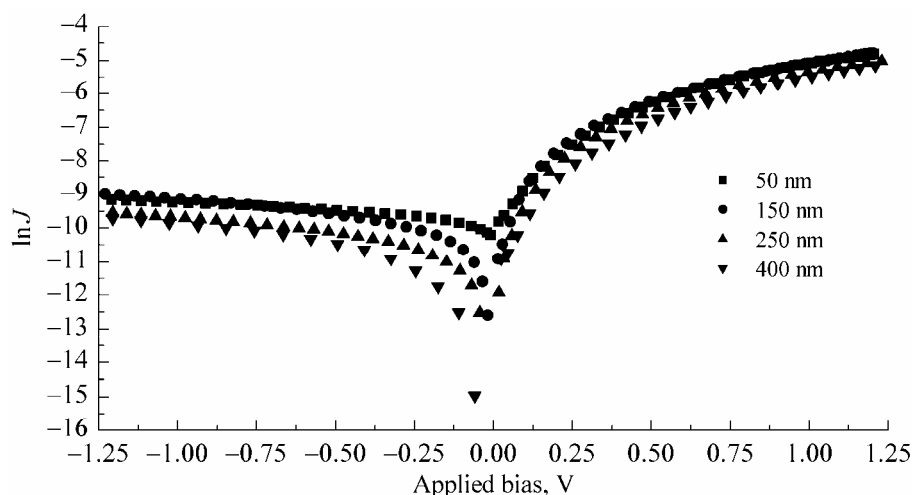


Рис.4. Зависимость логарифма плотности тока (в единицах  $\text{A}/\text{cm}^2$ ) от приложенного внешнего смещения для ГС a-Ge/p-Si при различных толщинах пленок a-Ge.

Изготовленные нами структуры, вне зависимости от толщины пленок a-Ge, обладали выпрямляющими свойствами, с коэффициентом выпрямления  $q$  (отношение прямого тока к обратному) порядка 70 при 1 В. ВАХ переходов при прямых (+ на p-Si) смещениях удовлетворительно аппроксимируется соотношением для плотности тока  $J = CV^m$ , где  $m$  меняется от 1.45 до 1.95 в зависимости от приложенного прямого смещения и от толщины пленки. В табл.1 приведены основные электрические характеристики ГС a-Ge/p-Si.

Почти квадратичный закон ( $m=1.95$ ) зависимости плотности тока от прямого смещения для ГС a-Ge/p-Si с толщиной пленки a-Ge 400 нм указывает на преобладание тока, ограниченного объемным зарядом, что является следст-

вием уменьшения количества дефектов и локализованных состояний в “запрещенной” зоне а-Ge при увеличении толщины пленки. Отклонение от квадратичного закона плотности тока для ГС а-Ge/p-Si при толщинах пленки а-Ge 150 нм и 250 нм связано с наличием высокой концентрации локализованных состояний в “запрещенной” зоне германия, обусловленной оборванными связями. При толщине пленки а-Ge 50 нм токоперенос через ГС а-Ge/p-Si можно объяснить неконтролируемым естественным окислением, которое захватывает большую часть объема пленки. Подобное объяснение прямых ВАХ ГС а-Ge/p-Si согласуется с толщинной зависимостью  $E_{\text{opt}}$  для пленок а-Ge (рис.2).

Табл.1. Электрические характеристики ГС а-Ge/p-Si.

| Толщина пленки а-Ge, нм | Прямое смещение, В | $C, 10^{-3}$ | $m$  | $q$ (1В) | Плотность тока при 1 В (обратное смещение), $10^{-5}$ А/см <sup>2</sup> |
|-------------------------|--------------------|--------------|------|----------|-------------------------------------------------------------------------|
| 50                      | 0.1–0.3            | 4.1          | 1.45 | 64       | 9.63                                                                    |
|                         | 0.35–0.85          | 6.3          | 1.8  |          |                                                                         |
|                         | 0.9–1.2            | 6            | 1.45 |          |                                                                         |
| 150                     | 0.075–1.2          | 6.3          | 1.65 | 58       | 10.75                                                                   |
| 250                     | 0.075–1.2          | 4.8          | 1.7  | 80       | 6.25                                                                    |
| 400                     | 0.075–1.2          | 4.1          | 1.95 | 78       | 5.25                                                                    |

#### 4. Заключение

На основе экспериментальных исследований оптических свойств пленок а-Ge и ВАХ ГС а-Ge/p-Si, полученных вакуумным лазерным осаждением германия, установлено следующее.

1. Оптические свойства пленок а-Ge в диапазоне длин волн 400–1000 нм объясняются моделью Тауца для аморфного полупроводника.
2. Наблюдается толщинная зависимость оптической ширины “запрещенной” зоны пленок а-Ge.
3. При прямых смещениях ВАХ гетероструктуры а-Ge/p-Si удовлетворительно аппроксимируется соотношением для плотности тока  $J = CV^m$ .
4. Объяснение прямых ВАХ ГС а-Ge/p-Si согласуется с толщинной зависимостью  $E_{\text{opt}}$  для пленок а-Ge.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A.H.Clark. Phys. Rev., **154**, 750 (1967).
2. K.L.Chopra, S.K.Bahl. Phys. Rev. B, **1**, 2545 (1970).
3. E.S.M.Goh, T.P.Chen, et al. J. Appl. Phys., **107**, 02435 (2010). doi:10.1063/1.3291103
4. M.H.Brodsky. Amorphous Semiconductors. Berlin, New York, Springer-Verlag, 1979.
5. Yu.A.Bityurin, S.V.Gaponov, et al. Sov. Electronnaja Promishlennost, **5-6**, 110 (1981).
6. J.C.Miller. Laser Ablation – Principles and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
7. R.K.Willardson, A.C.Beer. Semiconductors and Semimetals, New York, London, Academic Press, 1967.
8. J.Tauc, et al. Phys. Stat. Sol., **15**, 627 (1966).

ԼԱԶԵՐԱ-ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ՓՈՇԵՆՍՏԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ ՍՏԱՑՎԱԾ ԱՄՈՐՖ  
ԳԵՐՄԱՆԻՈՒՄԻ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ Vis-NIR ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ ԵՎ a-Ge/p-Si  
ՀԵՏԵՐՈՍՏՐԱԿՏՎԱԾՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Կ.Է. ԱՎԶՅԱՆ, Լ.Ա. ՄԱԹԵՎՈՍՅԱՆ, Ա.ՅՈՒ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Ա.Մ.ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

Ուսումնասիրված են լազերա-իմպուլսային փոշենստեցման մեթոդով ստացված a-Ge թաղանթների (հարթակը ապակի) օպտիկական և a-Ge/p-Si հետերոկառուցվածքի էլեկտրական հատկությունները: Ցույց է տրված, որ a-Ge թաղանթների օպտիկական հատկությունները լավ բացատրվում են Տաուցի ամորֆ կիսահաղորդիչների մոդելով: Ստացված է ամորֆ Ge օպտիկական ճեղքի լայնության կախվածությունը թաղանթի հաստությունից: Ուղիղ շեղումների դեպքում a-Ge/p-Si հետերոկառուցվածքի վոլտ-ամպերային բնութագիրը մեծ ճշտությամբ մոտարկվում է հոսանքի խտության  $J = CV^m$  առնչությամբ, որտեղ  $m$  փոփոխվում է 1.45–1.95 տիրույթում կախված կիրառված լարումից և a-Ge թաղանթի հաստությունից: Նշված հետերոկառուցվածքի (a-Ge թաղանթի հաստությունը՝ 400 նմ) համար դիտվել է հոսանքի խտության գրեթե քառակուսային կախում, ինչը պայմանավորված է սահմանափակ ծավալային լիցքերի հոսանքի գերակշռումով:

Vis-NIR CHARACTERISTICS OF AMORPHOUS GERMANIUM FILMS  
AND ELECTRICAL PROPERTIES OF a-Ge/p-Si HETEROSTRUCTURE  
OBTAINED BY PULSED-LASER DEPOSITION METHOD

K.E. AVJYAN, L.A. MATEVOSYAN, A.Yu. MKRTCHYAN, A.M. KHACHATRYAN

Optical properties of a-Ge films (glass substrate) and electrical properties of the a-Ge/p-Si heterostructure obtained by the pulsed-laser deposition method have been studied. It is shown that optical properties of a-Ge films can be well explained by the Tauc model for amorphous semiconductor. The dependence of optical gap on the film thickness is obtained for a-Ge films. Forward bias current–voltage characteristics of the heterostructure a-Ge/p-Si is satisfactorily approximated by the relation for current density  $J = CV^m$ , where  $m$  varies from 1.45 to 1.95 depending on the applied forward bias and a-Ge film thickness. Also, for the mentioned heterostructure (a-Ge film thickness is 400 nm) nearly quadratic dependence of the current density is observed, which indicates the predominance of the space-charge-limited current.