



Beynəlxalq Konfrans "Fizika-2005" International Conference "Fizika-2005" Международная Конференция "Fizika-2005"

7 - 9
Iyun
June 2005
Июнь

səhifə
№235 page 882-884
стр.

Bakı, Azərbaycan

Baku, Azerbaijan

Баку, Азербайджан

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАДИАЦИОННОСТОЙКИЕ ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ТИПА $A^{III}B^{VI}$

АСКЕРОВ К.А., ИСМАЙЛОВ Ф.И., БЕКТАШИ М.Г., ГАДЖИЕВА В.И.

*Институт Физики НАН Азербайджана,
ул. Г.Джавида 33, AZ-1143*

Статья посвящена разработке и исследованию радиационной стойкости фотодиодов на основе слоистых соединений $ZnSe$, Bi_2Se_3 , $ZnTe$, предназначенных для видимой и ближней ИК-области спектра. Процесс диффузии и растворимости различных примесей в слоистых полупроводниках. Показано, что изменение фото чувствительности фотодиодов при воздействии ионизирующего излучения связано с изменением времени жизни основных носителей заряда. Определена радиационная стойкость исследуемых фотодиодов и выявлена возможность использования их в условиях повышенной радиации.

На современном этапе развития науки одной из важнейших задач является создание фотоприемников в области спектра 0,6-1,1 мкм, работоспособных в условиях повышенной радиации.

Существующие в настоящее время фотоприемники в области спектра 0,6-1,1 мкм не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым по радиационной стойкости фотоэлектронным приборам. С другой стороны, создание фотоприемников на основе не очень дорогостоящих слоистых полупроводников, повышает эффективность, качество приборов и снижает трудоемкость при их изготовлении.

Данная работа посвящена созданию и исследованию радиационной стойкости фотодиодов на основе монокристаллов селенида галлия, селенида индия и теллурида галлия.

Для разработки фотодиодов изучена диффузия и растворимость различных примесей в указанных выше соединениях. Известно, что олово является донорной примесью для селенида галлия, а индий и серебро - наиболее подходящие контактные материалы для указанных соединений, кристаллизующихся в гексаганной слоистой структуре и по механическим и электрофизическим свойствам являющихся анизотропными.

Для исследования диффузии использовали специально не легированные монокристаллические образцы $GaSe$ р-типа, In_2Se_3 n-типа, $GaTe$ р-тип, имеющие удельное сопротивление при комнатной температуре 10^2-10^4 , $10^2-1,5 \cdot 10^2$ и $4 \cdot 10^2-10^3$ Ом·см соответственно, выращенные методами Бриджмена - Стокбаргера и медленного охлаждения при постоянном градиенте температуры.

Диффузию проводили параллельно главной оптической оси кристалла C (т.е. перпендикулярно к слоям) с помощью вакуумно напыленных на свежесколотую поверхность образцов радиоактивных изотопов ^{113}Sn , ^{114m}In , ^{110}Ag , ^{125}Te , ^{115m}Cd в интервале температур 200-700 °C. Время диффузионного отжига изменяли в зависимости от температуры в пределах 25-105 ч, что обеспечивало проникновение диффундирующих элементов на глубину до 500 мкм.

С целью исключения влияния радиоактивного излучения из боковых граней последние были удалены на глубину предполагаемого диффузионного слоя (~1мм). Распределение диффундирующих элементов по глубине образца анализировали методом последовательного снятия слоев [1], а однородность распределения контролировали послойной авто радиографией. Излучение регистрировали при помощи одноканальных счетчиков импульсов с погрешностью 7%.

Поскольку во всех случаях кривые распределения концентрации диффундирующих веществ на глубине образца подчиняются стандартной егс-функции, коэффициенты диффузии по экспериментальным данным рассчитывали при начальных и граничных условиях, соответствующих постоянному источнику [1]. Максимальное значение поверхностной концентрации ограничивается пределами растворимости примесей, диффундирующих в исследуемые образцы.

Температурные зависимости коэффициентов диффузии индия, серебра и олова селенида галлия. Характер изменения коэффициентов диффузии от температуры селениде галлия подчиняется закону Аррениуса и описывается следующими уравнениями

(здесь и далее энергия активации дана в эВ):
 $D_{\text{In} \rightarrow \text{GaSe}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \exp(-0,70/kT)$; $D_{\text{Ag} \rightarrow \text{GaSe}} = 1,6 \cdot 10^{-9} \exp(-0,14/kT)$;
 $D_{\text{Sn} \rightarrow \text{GaSe}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \exp(-1,08/kT)$;
 Температурные зависимости коэффициентов диффузии и самодиффузии индия, теллура и кадмия в кристаллах InSe, GaTe от температуры также подчиняются экспоненциальному закону:
 $D_{\text{Te} \rightarrow \text{InSe}} = 2 \cdot 10^{-6} \exp(-0,46/kT)$;
 $D_{\text{In} \rightarrow \text{GaTe}} = 4 \cdot 10^{-9} \exp(-0,23/kT)$;
 $D_{\text{In} \rightarrow \text{InSe}} = 6,3 \cdot 10^{-2} \exp(-0,90/kT)$;
 $D_{\text{Te} \rightarrow \text{GaTe}} = 4 \cdot 10^{-6} \exp(-0,70/kT)$;
 $D_{\text{Cd} \rightarrow \text{InSe}} = 1,45 \cdot 10^{-8} \exp(-0,27/kT)$;
 $D_{\text{Cd} \rightarrow \text{CaTe}} = 0,5 \cdot 10^{-5} \exp(-1,44/kT)$.

Малые значения энергии активации диффузии индия, серебра, теллура и кадмия в исследуемых кристаллах говорят о том, что диффузия этих примесей носит одинаковый характер и происходит по межузельному механизму. Самодиффузия индия и теллура в кристаллах InSe и GaTe, а также диффузия олова в GaSe и кадмия GaTe характеризуются сравнительно высокими значениями энергии активации. Это дает основания предполагать, что упомянутые процессы в основном осуществляются по вакансиям соответствующих элементов в указанных соединениях.

Значение растворимости исследуемых примесей в этих соединениях при различных температурах представлены в таблице. Видно, что для селенида галлия наблюдается противоположный характер зависимости растворимости олова (N_{Sn}) и серебра (N_{Ag}) от температуры: N_{Sn} уменьшается с ростом температуры, а N_{Ag} увеличивается. Различия в поведении растворимостей данных элементов можно объяснить с позиции химии точечных дефектов [2], согласно которой растворимость донора тем выше, чем больше в материале концентрация дырок. Процесс растворения донорных атомов олова в GaSe описывается следующей квазихимической реакцией: $\text{Sn}_{\text{ж}} \text{Sn} \cdot \text{Ga} + e'$, $k = (\text{Sn} \cdot \text{Ga}) n / A_{\text{Sn}}$ откуда $(\text{Sn} \cdot \text{Ga}) = k A_{\text{Sn}} / n$. Здесь k - константа равновесия, n -

концентрация электронов, A_{Sn} - активность олова в жидкой фазе, $(\text{Sn} \cdot \text{Ga})$ - концентрация олова в кристалле.

Селенид индия галлия при комнатной температуре проявляет р-тип проводимости за счет преобладания вакансий галлия, однако по мере увеличения температуры растет концентрация электронов, за счет перехода зона-зона, то есть проводимость материала приближается к собственной. Естественным результатом роста концентрации электронов является уменьшение растворимости олова с ростом температуры [1]. Поскольку серебро для этих соединений - акцептор, увеличение концентрации электронов должно сопровождаться ростом растворимости примесей, что и наблюдается в эксперименте (таблица 1).

Индий относится к той же группе, что и галлий поэтому можно ожидать, что атомы индия находятся в исследуемых образцах в нейтральном состоянии.

В образцах теллурида галлия растворимость индия и теллура носит ретроградный характер. По видимому такой характер растворимости в данном случае связан с летучестью теллура [4].

Нам представляется целесообразным подчеркнуть, что поскольку диффузия происходила в направлении перпендикулярном к слоям, это означает, что полная вероятность миграции диффузанта через кристалл в указанном направлении должна определяться произведением двух вероятностей: вероятности миграции через собственные слои и вероятности прохождения через потенциальный барьер, образуемый межслоевым "промежутком". Сама прослойка может представлять собой сток, или, иначе говоря, место, где диффузанта может накапливаться, что также должно отражаться в параметрах диффузионного процесса. Полученные данные использованы для получения электронодырочных переходов.

Таблица № 1

t, °C	N, см ⁻³											
	GaSe			InSe				GaTe				
	¹¹⁰ Ag	¹¹³ Sn	^{114m} In	^{114m} In	¹¹⁰ Ag	¹²⁵ Te	^{113m} Sd	^{114m} In	¹¹⁰ Ag	¹²⁵ Te	^{113m} Sd	¹¹³ Sn
200				3,0·10 ¹⁸		1,6·10 ¹⁸		9,0·10 ¹⁸		10 ¹⁹		
250	10 ¹⁹				3,0·10 ¹⁹				10 ¹⁹			
300				10 ¹⁸		2·10 ¹⁸		10 ¹⁹		2·10 ¹⁹		
350	2·10 ¹⁰				3,0·10 ¹⁹				2·10 ¹⁹			
400		2·10 ²¹					3,5·10 ¹⁹				3,0·10 ¹⁹	2,7·10 ¹⁹
450				10 ¹⁷		2·10 ¹⁸		2·10 ¹⁸		3,0·10 ¹⁸		
500	1,2·10 ²⁰	2·10 ²⁰	4,0·10 ¹⁸		10 ²⁰		3·10 ²¹		1,5·10 ²⁰		3,5·10 ²¹	7,0·10 ¹⁹
600							4,1·10 ²⁰				5·10 ¹⁹	4,0·10 ²¹
650		10 ²⁰	1,2·10 ¹⁸									
700			7,5·10 ¹⁷									

В работе [3] подробно описаны разработки физических основ конструкции и технологии изготовления фотодиодов на основе селенида галлия, селенида индия и теллурида галлия. Исследуемые фотодиоды обладали фоточувствительностью в области спектра 0,45-1,1 мкм с максимумами $\lambda_{\text{GaSe}} = 0,63 \text{ мкм}$, $\lambda_{\text{InSe}} = 0,95 \text{ мкм}$ и $\lambda_{\text{GaTe}} = 0,85 \text{ мкм}$ при комнатной температуре, а также сравнительно повышенными фотоэлектрическими параметрами.

Основные характеристические параметры таких фотодиодов приведены в таблице № 2.

Для определения стойкости к ионизирующим излучениям изучены воздействия различных видов

облучения на фотоэлектрические параметры фотодиодов.

До, после и в процессе облучения низкоэнергетическим электронами с энергией 6 МэВ (флюенсом $10^{12} \div 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и гамма - квантами (флюенсом $10^5 \div 10^8 \text{ Р}$), высокоэнергетическими электронами с энергией 25 МэВ (флюенсам $10^{12} \div 10^{16} \text{ см}^{-2}$), протонами (флюенсом $10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-2}$), нейтронами ($10^{11} \div 10^{14} \text{ см}^{-2}$) измерялись вольт-амперные, спектральные характеристики фотодиодов на основе селенида галлия, селенида индия и теллурида галлия. При этом контролировались изменения монохроматической интег-

ральной и вольт-ваттной чувствительности фотодиодов. Кроме того, определены времена потери работоспособности фотодиодов в процессе импульсного гамма - нейтронного и импульсного гамма облучения по восстановленным значениям напряжения сигнала и шума. При воздействии проникающей радиации возникает широкий диапазон изменений параметров фотодиодов вследствие изменения характеристик полупроводниковых мате-

риалов [3]. Анализ ВАХ прямосмещенных фотодиодов, облученных различными частицами показывает, что с ростом флюенса облучения токи прямых и обратных ветвей ВАХ увеличиваются, при этом коэффициент качества β резко возрастает ($2 \leq \beta \leq 5$), что можно связать с образованием поверхностных каналов проводимости. Увеличение темновых токов связано с возрастанием токов за счет ионизационных эффектов в объеме фотодиода.

Таблица № 2

Фотодиоды	Условия эксплуатации			I MкА	S _{абс} , А/Вт	I, В/Вт	I _{штг} , mA/lm	R, Ом
	U _{см} , В	λ_{max} , МКМ	T, К.					
Sn-p-GaSe	3	0,63	300	0,03	0,5-1,84	(2,1-4,1) · 10 ⁴	10-20	10 ⁷
	5	0,55	300	0,04	0,3-0,80	(1,4-3,0) · 10 ⁴	3-15	
Au-n-InSe	3	0,95	300	0,04	0,1-4,0	(1,3-7,1) · 10 ⁴	10-20	10 ⁵⁻¹⁰ 6
	3	0,95	263	0,04	0,3-9,2	(2,9-9,1) · 10 ⁴	15-25	
Sn-p-GeTe	3	0,85	300	0,05	0,3-1,5	(1,0-3,3) · 10 ⁴	3-10	10 ⁵⁻¹⁰ 7
	5	0,85	300	0,05	0,5-2,2	(1,5-4,5) · 10 ⁴	5-12	

На основании измерений спектральных характеристик фотодиодов до и после различных видов ионизирующих излучений установлено, что изменение фоточувствительности фотодиодов на основе GaSe, InSe и GeTe, носит одинаковый характер: при малых флюенсах облучения фоточувствительность увеличивается, а большие флюенсы приводят к уменьшению фоточувствительности. С целью изучения причины изменений фоточувствительности фотодиодов, измерены времена жизни основных носителей тока после облучения электронами с энергией 25 МэВ, импульсными нейтронами и гамма-квантами. Установлено, что увеличение интегрального флюенса электронов с энергией 25 МэВ и импульсных нейтронов время спада фототока монотонно уменьшается, а низко энергетическая облучение приводит к росту времени спада фототока. Поэтому, можно предположить, что изменение времени жизни - это один из основных факторов, ответственных за изменение фоточувствительности облученных фотодиодов.

В процессе проведения исследований на импульсной гамма установке и на импульсном реакторе снимались осциллограммы изменения напряжения сигнала и напряжения шумов по двум каналам с двух фотодиодов одновременно для определения времени потери работоспособности. В результате измерений на импульсной гамма-установке при эффективной длительности импульса $\tau = 10,3-10,9$ нс по значению U_c при мощности $P_\gamma = 1,7 \cdot 10^{10}$ P/c время потери работоспособности фотодиодов на основе исследуемых соединений составляет $\tau_{\text{впр}} \leq 1,0$ с, а по значению $U_{\text{ш}}$ при мощности $P_\gamma = 3,08 \cdot 10^{10}$ P/c, составляет $\tau_{\text{впр}} \leq 0,05$ с. В результате измерений на импульсном реакторе найдены следующие величины для $\tau_{\text{впр}}$: при флюенсе нейтронов $\Phi_n = 3,08 \cdot 10^{12}$ см⁻², $\tau_{\text{впр}} \leq 1,8$ с по восстановлению U_c , а по восстановлению $U_{\text{ш}}$, при флюенсе $\Phi_n = 3,35 \cdot 10^{12}$ см⁻², $\tau_{\text{впр}} \leq 0,01$ с. Через

6-11 суток после облучения на этих же фотодиодах снималось спектральное распределение чувствительности. После облучения при малых флюенсах их чувствительность увеличивается и максимум ее сдвигается в длиноволновую область спектра. Соответственно, увеличивается их монохроматическая и вольт-ваттная чувствительность, примерно в 2-3 раза. С другой стороны, не исключается возможность того, что при малых флюенсах облучения может происходить, в основном, перераспределение примесей золота и олова, вследствие чего получается более совершенный и стабильный p-n переход и фоточувствительность фотодиодов увеличивается.

Невысокие энергетические барьеры, существующие в межслойном промежутке слоистых материалов благоприятствуют миграции радиационных дефектов с ростом флюенсов облучения. Это в свою очередь облегчает процесс образования комплексов из радиационных и исходных дефектов межслойных промежутках. Вследствие этого происходит образование новой высокоомной прослойки, приводящий к некоторому ухудшению фотоэлектрических параметров с ростом флюенса облучения. Следует отметить, что при воздействии ионизирующих излучений в указанных выше интервалах флюенсов на фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе GaSe, InSe и GaTe изменение значений основных характеристических параметров не превышает 30%.

Результаты проведенных исследований показывает, что фотоприемники на основе слоистых соединений GaSe, InSe и GaTe открывают возможность их использования в системах работающих в видимой и ближней ИК-области спектра, в частности, в астронавигации.

[1]. Болтакс Б.И. Диффузия в полупроводниках. М., 1961. 462с.
 [2]. Крегер Ф. Химия несовершенных кристаллов. М.: Мир, 1969. 654с.
 [3]. К.А.Аскеров, Ф.К.Исаев, Д.Г.Амиров Дефектообразование и диффузионные процессы в

некоторых слоистых полупроводниках. Баку. 1991. 126с.
 [4]. Косенко В.Е. Диффузия сурьмы и цинка из паровой фазы в германии//Изв.АН СССР. Сер. физ.1956.Т.20.№ 12. С.1526-1530.