

ВЛИЯНИЕ ПРОНИКАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТР КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО РЗЭ И ГЕРМАНИЕМ

Э.А. ДЖАФАРОВА

Институт Физики АН Азербайджана

370143 Баку, ул. Г. Джавида 33

Исследованы кристаллы БЗП кремния, легированные РЗЭ (D_y, E_r) и Ge, подвергнутые облучению γ -квантами. Из спектров ИК-поглощения не обнаружено оптической активности, связанной с какими-либо скоплениями атомов РЗЭ или германия. Емкостные измерения барьеров Шоттки, изготовленных на основе Si (D_y, E_r, Ge) указали на отсутствие электрически активных центров. Анализ спектров DLTS показал, что для всех кристаллов Si (D_y, E_r, Ge) обнаруживается один уровень $E_c - 0.155$ эВ с сечением захвата $\sigma_n = 6.3 \cdot 10^{-16}$ см², имеющий концентрацию $10^{11} - 10^{12}$ см⁻³. Облучение γ -квантами приводит к образованию одинаковых радиационных дефектов (РД) с $E_c - 0.145$ эВ ($\sigma_n = 10^{-15}$ см²) и $E_c - 0.310$ эВ ($\sigma_n = 2.4 \cdot 10^{-16}$ см²) и их концентрации свыше дозы $1.0 \cdot 10^{17}$ кв·см⁻² почти одинаковы. Отсутствие какого-либо различия в скорости образования РД в легированных РЗЭ и Ge и контрольных образцах Si объясняется малостью концентрации введенной примеси.

Одной из важнейших задач полупроводникового приборостроения является повышение времени функционирования, которое связано, как с идеологией компоновки прибора, так и с устойчивостью материала к воздействию внешних факторов и, в первую очередь, к ионизирующим и тепловым.

Наиболее перспективным направлением решения этой проблемы является введение в объем полупроводникового кристалла, используемого в приборе, специальных центров рекомбинации, снижающих, с одной стороны, как стоки избыточных электрон-дырочных пар, а, с другой стороны, как фактор, повышающий пороговую энергию дефектообразования. К таким центрам следует отнести примесные комплексы, в частности, на основе редкоземельных элементов [1-6] и изовалентных примесей [7-10].

В последнее время опубликован ряд работ, касающихся как элемента, которым легируется кремний, а также механизма, благодаря которому реализуется радиационная стойкость [11,12]. В большинстве случаев объектом исследования является p-Si, выращенный методом Чохральского. Представляет интерес изучение на предмет радиационной стойкости n-Si, выращенного методом бестигельной зонной плавки (БЗП), отличающегося пониженным содержанием в нем кислорода. Целью настоящей работы является исследование радиационного дефектообразования в БЗП n-Si, легированном диспрози-

ем, эрбием, а также германием при облучении его малыми дозами γ -квантов.

Монокристаллы кремния диаметром 45-65 мм n-типа проводимости с удельным электрическим сопротивлением 100-500 Ом·см выращивались методом БЗП в атмосфере аргона при избыточном давлении $5 \cdot 10^2$ Па. Введение редкоземельных элементов диспрозия и эрбия производилась в процессе формирования поликристаллических стержней с последующим выращиванием бездислокационных кристаллов из них. Введение германия производили непосредственно при выращивании бездислокационных монокристаллов кремния. Процесс выращивания монокристаллов производили на установке БЗП "Кристалл 109М", отличающийся наивысшими условиями аппаратурной стерильности. Концентрацию вводимых легирующих примесей оценивали расчетным путем, и она составила для диспрозия и эрбия величину $\sim 1 \cdot 10^{14}$ ат/см³ и $\sim 1 \cdot 10^{16}$ ат/см³ для германия. Дополнительно концентрация РЗЭ определялась методом рентгено-флюоресцентного анализа и показала величины, сопоставимые с расчетными. Были исследованы 4 слитки n-Si, исходные параметры которых приведены в табл.1. Слитки были разрезаны на пластины толщиной 1,1 мм. Для оптических измерений обе стороны полировались. Измерения спектров ИК-поглощения производились в 2-х лучевой схеме (Specord IR – 75) при 300 К.

Таблица 1. Данные слитков по сертификатам

№ слитка	Состав кристалла	Кристаллографическое направление	Удельное сопротивление, Ом·см	Время жизни, мкс	Примечание
1	Si	<100>	497-368	1480-1630	свирлы отсутствуют
2	Si(D_y)	<111>	130-286	2100-2900	дислокации и свирлы отсутствуют
3	Si(E_r)	<111>	110-138	750-800	свирлы и дислокации отсутствуют
4	Si(Ge)	<111>	350-505	1200	Бездислокационный

Для измерения концентрации и параметров глубоких уровней (ГУ) на пластинах кремния были нанесены омические контакты и изготовлены барьеры Шоттки. При создании контактов нагрев пластин кремния не превышал 100 °С. Облучение Si пластин производилось до изготовления структур при 300 К γ -квантами от источника ⁶⁰Со интенсивностью $I = 1.37 \cdot 10^{13}$ квант/см²·с в течение

10,50 и 120 минут; дозы облучения составляли $8.2 \cdot 10^{15}$, $4.1 \cdot 10^{16}$ и $1.0 \cdot 10^{17}$ квант·см⁻².

Из спектров ИК-поглощения исследованных кристаллов следует, что концентрация оптически активного кислорода в них не превышает 10^{16} см⁻³. Концентрация углерода, определенная по поглощению в области 610 см⁻¹, находится ниже чувствительности метода.

Таким образом, все исследованные кристаллы имеют оптические свойства, характерные для кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки, не проявляя оптической активности, характерной для Si с введенной примесью РЗЭ, что может иметь место при низких концентрациях последних [3]. Оптическая картина всех кристаллов после облучения не изменилась.

Из вольтфарадных зависимостей при 300 К определена эффективная концентрация ионизированных центров, которая остается практически неизменной в пределах разброса от образца к образцу до и после облучения (см.

табл.2). Сравнение полученной концентрации в исходном Si с паспортными данными об удельном сопротивлении говорит об их хорошем согласии для всех слитков кроме слитка № 3. Измерения DLTS проводились на автоматической установке, работающей по принципу двойного стробирования с чувствительностью $\sim 10^{-4}$ от концентрации мелкой примеси. В рамках настоящей работы анализировались глубокие состояния в верхней половине запрещенной зоны (ловушки основных носителей заряда, в данном случае электронов).

Таблица 2. Эффективная концентрация ионизованных центров при $T=300$ °К, см^{-3}

№ слитка	Состав кристалла	Исходная концентрация, см^{-3}	Доза облучения гамма-квантами, $\text{квант}/\text{см}^2$		
			$8.2 \cdot 10^{15}$	$4.1 \cdot 10^{16}$	$1.0 \cdot 10^{17}$
1	Si	$1.0 \cdot 10^{13}$	$1.3 \cdot 10^{13}$	$0.9 \cdot 10^{13}$	$1.2 \cdot 10^{13}$
2	Si(D _v)	$3.5 \cdot 10^{13}$	$3.8 \cdot 10^{13}$	$3.01 \cdot 10^{13}$	$2.9 \cdot 10^{13}$
3	Si(E _r)	$3.9 \cdot 10^{13}$	$4.6 \cdot 10^{13}$	$4.4 \cdot 10^{13}$	$4.4 \cdot 10^{13}$
4	Si(Ge)	$1.0 \cdot 10^{13}$	$1.0 \cdot 10^{13}$	$1.3 \cdot 10^{13}$	$1.4 \cdot 10^{13}$

Во всех слитках исходного кремния на спектре DLTS обнаруживается один пик, связанный с глубоким уровнем

$E_c - 0.155$ эВ сечением захвата электронов $\sigma_n = 6.3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ (рис.1). Концентрация его не велика $\sim 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (табл.3).

Таблица 3. Содержание центра $E - 0.155$, см^{-3}

№ слитка	Состав кристалла	Исходная концентрация, см^{-3}	Доза облучения, $\text{квант}/\text{см}^2$		
			$8.2 \cdot 10^{15}$	$4.1 \cdot 10^{16}$	$1.0 \cdot 10^{17}$
1	Si	$4.1 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	-	-
2	Si(D _v)	$1.0 \cdot 10^{12}$	$4.8 \cdot 10^{11}$	-	-
3	Si(E _r)	$1.1 \cdot 10^{12}$	$7.0 \cdot 10^{11}$	-	-
4	Si(Ge)	$1.4 \cdot 10^{11}$	$4.5 \cdot 10^{11}$	-	-

Облучение γ -квантами приводит к образованию радиационных дефектов, основными из которых в верхней половине запрещенной зоны являются уровни $E_c - 0.145$ эВ ($\sigma_n = 10^{-15} \text{ см}^2$) и $E_c - 0.310$ эВ ($\sigma_n = 2.4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$). Типичный спектр DLTS облученного образца приведен на рис.2. Эти центры представляют собой, по-видимому, вакансионно-

связан с комплексом междоузельный-узельный углерод $C_1 - C_s$ [1,2]. Появление этого дефекта при малых дозах облучения (табл.4) незаметно на фоне центра $E_c - 0.155$, содержащегося в исходном Si и начинает преобладать при дозе $4.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Уровень $E_c - 0.310$ заметен уже при

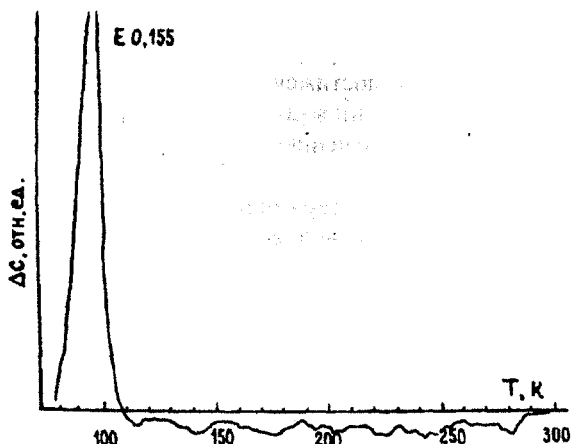


Рис.1. Типичный спектр DLTS диода Шоттки, изготовленного из исходного материала до облучения.

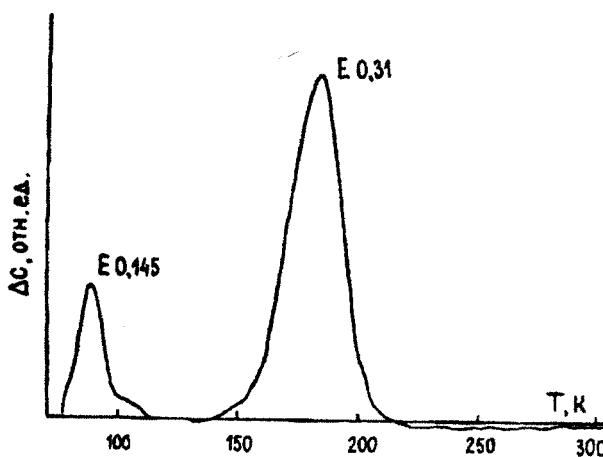


Рис.2. Типичный спектр DLTS диода Шоттки, изготовленного из кремния, облученного γ -квантами с дозой $10^{17} \text{ кВ}/\text{см}^2$.

-примесные комплексы. Ловушки $E_c - 0.145$ по энергии несколько меньше, чем обычно возникающий в кислородосодержащем Si A-центр ($E - 0.170$) [13] и может быть

наименьшей из использованных доз облучения, постепенно возрастая по концентрации с ростом дозы (табл.5).

Таблица 4. Концентрация радиационного дефекта $E - 0.145, \text{см}^{-3}$

№ слитка	Состав кристалла	Исходная концентрация, см^{-3}	Доза облучения гамма-квантами, $\text{квант}/\text{см}^2$		
			$8.2 \cdot 10^{15}$	$4.1 \cdot 10^{16}$	$1.0 \cdot 10^{17}$
1	Si	-	-	$1.4 \cdot 10^{12}$	$4.6 \cdot 10^{12}$
2	Si(D_V)	-	-	$1.2 \cdot 10^{12}$	$4.1 \cdot 10^{12}$
3	Si(E_T)	-	-	$1.6 \cdot 10^{12}$	$4.2 \cdot 10^{12}$
4	Si(Ge)	-	-	$1.6 \cdot 10^{12}$	$7.0 \cdot 10^{12}$

Таблица 5. Концентрация дефекта $E - 0.31, \text{см}^{-3}$

№ слитка	Состав кристалла	Исходная концентрация, см^{-3}	Доза облучения гамма-квантами, $\text{квант}/\text{см}^2$		
			$8.2 \cdot 10^{15}$	$4.1 \cdot 10^{16}$	$1.0 \cdot 10^{17}$
1	Si	-	$2.0 \cdot 10^{11}$	$2.8 \cdot 10^{12}$	$7.0 \cdot 10^{12}$
2	Si(D_V)	-	$2.0 \cdot 10^{10}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$4.6 \cdot 10^{12}$
3	Si(E_T)	-	$1.6 \cdot 10^{11}$	$1.6 \cdot 10^{12}$	$5.7 \cdot 10^{12}$
4	Si(Ge)	-	$6.0 \cdot 10^{10}$	$2.0 \cdot 10^{12}$	$7.6 \cdot 10^{12}$

Центр этот наблюдался в работе [14], где полагали, что он представляет собой комплекс дивакансии с фосфором. Концентрация ловушки $E_c - 0.310$ довольно сильно различается для разных слитков, облученных малой дозой, и очень близка в образцах, облученных большой дозой. На рис.3 приведена зависимость количества дефектов $E_c - 0.310$ от дозы облучения, из которой видно, что скорость введе-

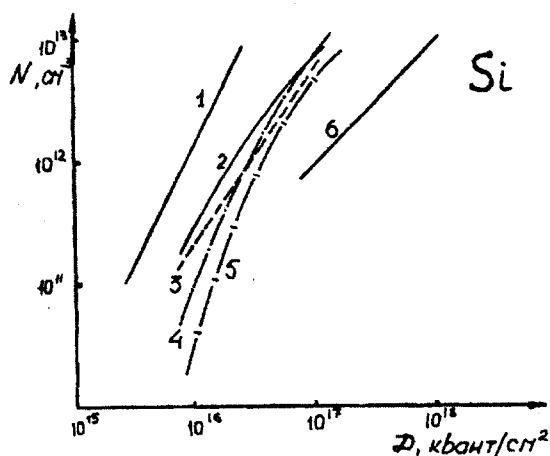


Рис. 3. Дозовая зависимость концентрации радиационного дефекта $E - 0.31$ для образцов: 2 - Si, 3 - Si(D_V), 4 - Si(E_T), 5 - Si(Ge); 1 и 6 - теоретические кривые: 1 - $N \sim D^2$, 6 - $N \sim D$.

ния последних в разных слитках близка: при малых дозах она суперлинейна (приблизительно квадратичная), при больших дозах стремится к линейной зависимости. Концентрация E -центра в исследованных образцах не превышает 10^{10}см^{-3} . Это связано, вероятно, с малой концентрацией мелких доноров.

Таким образом, DLTS показали, что во всех слитках после γ -излучения образуются одинаковые РД, и их концентрации после дозы $1 \cdot 10^{17} \text{см}^{-2}$ примерно одинаковы.

Следует отметить, что концентрация РЗЭ и германия, несмотря на регистрируемые изменения в поведении монокристаллического кремния (увеличение величины времени жизни в н.з., снижение содержания углерода и кислорода), все же являются недостаточными для увеличения устойчивости к воздействию внешних факторов.

На основании приведенных выше экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Легирование БЗП n-Si эрбием, диспрозием и германием в вышеуказанных концентрациях не приводит к появлению электрически активных центров. Наличие уровня $E_c - 0.155$ эВ, обнаруженного во всех слитках, включая и контрольный, можно интерпретировать как уровень неконтролируемой примеси, специфичный для данной установки выращивания Si.
2. Спектры ИК-поглощения указывают на низкое содержание кислорода и углерода, характерное для кристаллов, выращенных методом бестигельной зонной плавки. Оптической активности, связанной с какими-либо скоплениями атомов РЗЭ или германия, не обнаружено. Одной из вероятных причин этого может быть малая концентрация легирования кремния РЗЭ.
3. Благоприятное воздействие используемых легирующих примесей на электрофизические параметры кремния проявилось в достижении более высоких значений величины времени жизни (ВЖ) неосновных носителей заряда по сравнению с нелегированным кремнием.

Учет пониженного содержания примесей углерода и кислорода в ИК-активной форме и высокие значения ВЖ позволяют предположить некоторую перестройку центров рекомбинации в сторону их увеличения, а следовательно, и снижения концентрации.

4. Отсутствие какого-либо различия в скорости образования радиационных дефектов в легированных РЗЭ и германием и контрольных образцах, как это наблюдалось ранее для других РЗЭ и изоэлектронных примесей в Si, можно объяснить малостью концентрации введенной примеси.

[1] В.В. Петров, В.С. Просолович. ЖПС, №6, 1987, с. 1021-1024.

[2] С.С. Худойбердыев, Ю.А. Карпов, С.В. Музаптаров, Д.Э. Назыров. Электрические свойства эрбия в

- кремнии, Кн. Исследования по физике твердого тела и материаловедения, Ташкент, 1988, с.21-23.
- [3] *Д.И. Бринкевич, В.В. Петров, В.С. Просолович, Ю.В. Трубицын, К.В. Харченко, В.Ю. Явид.* Влияние редкоземельных элементов на радиационное дефектообразование в кремнии n-типа, выращенном методом бестигельной зонной плавки. В кн. "Проблемы создания полупроводниковых приборов, И.С. и РЭА на их основе, стойких к ВВФ". Тезисы докладов V межотраслевого семинара 9-14 сентября 1991, М., 1991, часть 1, с.39-40.
- [4] *Н.Т. Багреев, Д.Е. Опопко, А.И. Рыскин.* ФТП, 1996, т. 30, в. 10, с. 1855.
- [5] *В.Ф. Мастеров, Ф.С. Насрединов, П.П. Серегин.* ФТП, 1998, т. 32, № 6, с. 708.
- [6] *В.В. Емцев, В.В. Емцев (мл.), Д.С. Полоскин.* ФТП, 1999, т. 33, № 6, с. 649.
- [7] *В.Б. Неймаш, М.Г. Соснин, Б.М. Туровский, В.И. Шаховцев, В.Л. Шиндич.* ФТП, 1982, т. 16, вып., с.901-903.
- [8] *М.Я. Дашевский, Д.Н. Корляков, В.А. Миляев, В.А. Никитин.* ФТП, т. 22, вып. 6, 1998, с. 1146-1149.
- [9] *Ю.В. Трубицын, В.И. Анцюнес, К.Н. Неймарк, Э.С. Фелькевич, И.Ф. Червоный.* Исследование радиационной стойкости монокристаллов бестигельного кремния, легированного германием. В кн. "Проблемы создания полупроводниковых приборов ИС и РЭА на их основе, стойких к воздействию ВФ". Тезисы докладов V межотраслевого семинара 9-14 сентября 1991 г. М., 1991, часть 1, с. 48-49.
- [10] *Л.Н. Хруненко, В.Н. Шаховцев, В.В. Шумов.* ФТП, 1998, т. 32, в. 2, с. 132.
- [11] *В.Е. Бустов, В.Н. Шаховцев, В.Л. Шиндич.* Препринт №20 Института физики АН УССР, Киев, 1998.
- [12] *Д.Э. Назыров, А.Р. Регель, Г.С. Куликов.* Препринт № 1122 ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, Ленинград, 1987.
- [13] *М. Бургуев, М. Ланно.* Точечные дефекты в полупроводниках, Экспериментальные аспекты, М., Мир, 1985.
- [14] *А.А. Лебедев, И.А. Султанов, В. Экке.* ФТП, 1987, т.21, в.1, с.18-22.

Е.Ә. Сәғәрова

Ge VƏ NADİR TORPAQ ELEMENTLƏRİ İLƏ LEQİRƏLƏNMİŞ SILISIUM ELEKTRON SPEKTRINƏ ŞÜALANMANIN TƏSİRİ

Silisiumun BZP yolu ilə alınmış Ge və nadir torpaq elementləri (D_y , E_r) ilə leqirəlməmiş və γ kvantlarla şüalandırılmış kristalları tədqiq edilmişdir. İnfraqırmızı udulmanın spektrində nadir torpaq elementlərinin və Ge-un atomlarının toplusu ilə əlaqəli optik aktivlik müşahidə olunmayıb. $Si\langle D_y, E_r, Ge \rangle$ əsasında hazırlanmış Şottki baryeri əsasında tutum ölçmələri elektrik aktiv mərkəzlərinin olmadığını göstərir. DLTS spektrlərinin analizi göstərir ki, bunun $Si\langle D_y, E_r, Ge \rangle$ kristalları üçün zəbtetmənin effektiv kəşiyinin sahəsi $\sigma_n = 6.3 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2$ konsentrasiyası $10^{11} - 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ bir səviyyə $E_c - 0.155 \text{ eV}$ müşahidə olunur. γ kvantlarla şüalanma eyni radiasiya defektlərinin $E_c - 0.145 \text{ eV}$ ($\sigma_n = 10^{-15} \text{ sm}^2$) və $E_c - 0.310 \text{ eV}$ ($\sigma_n = 2.4 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2$) $1.0 \cdot 10^{17} \text{ kv} \cdot \text{sm}^{-2}$ yaratmasına gətirir və γ kvantlarının $1.0 \cdot 10^{17} \text{ } \gamma / \text{sm}^2$ -dən yüksək dozasında onların konsentrasiyası təqribən eynidir. Nadir torpaq elementləri və Ge ilə leqirəlməmiş Si-di və kontrol nümunədə radiasiya defektlərinin əmələ gəlmə sür'ətlərində müxtəlifliyin olmaması daxil edilmiş aşqarların konsentrasiyasının kiçikliyi ilə izah olunur.

E.A. Jafarova

THE RADIATION DAMAGES IN ZONE MELTING n-SILICON DOPED BY D_y , E_r AND Ge

The crystals of zone melting Si doped by rare- earth elements, REE (D_y , E_r) and Ge, and exposed by γ -ray from ^{60}Co were researched. In infrared absorb spectra didn't found optical activity connected of some REE or Ge atoms concentrations. The capacity measurements of the Shottky barrier fabricated on the basis of the Si (D_y , E_r , Ge) are shown the absence of electrical activity centers. The analysis of DLTS spectra are pointed for all crystals of the Si on one level $E_c - 0.155 \text{ eV}$ with capture section $\sigma_n = 6.3 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2$ and $10^{11} - 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ concentration. The explosion of γ -ray is made of the formation of the same radiation defects with $E_c - 145 \text{ eV}$ ($\sigma_n = 10^{-15} \text{ sm}^2$) and $E_c - 0.310 \text{ eV}$ ($\sigma_n = 2.4 \cdot 10^{-16} \text{ sm}^2$) and on top of dose $1.0 \cdot 10^{17} \text{ } \gamma / \text{sm}^2$ their concentration are equally. The absence some difference of the formation RD in all Si patterns is explained by small concentration doped elements.