

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИМЕСИ ЦИНКА С РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЙ.

М.Я. БАКИРОВ, Н.И. ИБРАГИМОВ

Институт Физики АН Азербайджана

370143, Баку, пр. Г. Джавида, 33

Исследована термическая стабильность радиационных дефектов в монокристаллах $Ge_{0,9}Si_{0,1}$, легированных цинком и сурьмой с концентрациями порядка 10^{15} см^{-3} . В процессе облучения электронами с энергией 5 МэВ при комнатной температуре в интервале доз $10^{13} - 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ сохраняется нижний акцепторный уровень цинка $E_v+0,05 \text{ эВ}$, однако концентрация дырок существенно уменьшается. При дозе $> 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ концентрация дырок продолжает уменьшаться и проявляется второй акцепторный уровень цинка $E_v+0,13 \text{ эВ}$. Предполагается, что уменьшение концентрации дырок при облучении обусловлено переходами атомов цинка из узлов в междоузлия из-за взаимодействия их с радиационными дефектами. Показано, что изохронный отжиг ($40-300 \text{ }^\circ\text{C}$; 30 мин.) легированных цинком и облученных монокристаллов твёрдого раствора $Ge_{0,9}Si_{0,1}$ приводит к увеличению концентрации дырок, протекает в одну ступень вблизи $120 \text{ }^\circ\text{C}$ и имеет место реактивация примеси цинка.

Для обнаружения удалённых источников инфракрасного излучения, находящихся в земной атмосфере, используются приёмники, обладающие максимальной обнаружительной способностью в области прозрачности атмосферы. При этом характеристика пропускания атмосферы определяет оптимальную величину длинноволновой границы приёмника, равную примерно 14 мкм. Для изготовления приёмников излучения с длинноволновым краем 14 мкм часто применяют твёрдые растворы Ge-Si, легированные цинком и сурьмой [1-3]. Атомы цинка создают в запрещённой зоне твёрдого раствора $Ge_{0,9}Si_{0,1}$ два акцепторных уровня с энергиями активации $E_v+0,05 \text{ эВ}$ и $E_v+0,13 \text{ эВ}$ [4]. Для получения указанного края обычно используют второй уровень цинка, а первый компенсируется примесью сурьмы. Обнаружительная способность таких приёмников составляет $10^{10} \text{ см}^2 \text{ Гц}^{-1} \text{ Вг}^{-1}$ при $T=20,4 \text{ К}$.

Эти приёмники, попадая в поле ионизирующих излучений, постепенно теряют чувствительность и выходят из строя. Предполагается, что потеря чувствительности обусловлена образованием и распадом комплексов первичных радиационных дефектов с примесями. В связи с изложенным, изучение взаимодействия примесей с радиационными дефектами в кристаллах твёрдого раствора Ge-Si актуально. В данной работе приведены результаты, связанные с взаимодействием примесей цинка с радиационными дефектами в монокристалле $Ge_{0,9}Si_{0,1}$.

Исследования проводились на легированных цинком и сурьмой монокристаллах, полученных методом Чохральского. Примеси цинка и сурьмы вводились в процессе выращивания [4], и отбирались те кристаллы, в которых концентрация цинка составляла $\leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$, т.к. при больших концентрациях ($> 10^{16} \text{ см}^{-3}$) начинает проявляться взаимодействие между примесными центрами [5]. Для исключения влияния основной и компенсирующей примесей на энергию ионизации, отбирались образцы, в которых концентрации обеих примесей были приблизительно равными, составляли $\approx 9 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и определялись по температурной зависимости концентрации свободных носителей, полученной из измерений ЭДС Холла в интервале температур 77-300 К (погрешность эксперимента не превышала 10 %) [6].

Если кристалл содержит заряженные и нейтральные примеси и дефекты, то существует определённая вероятность того, что они окажутся в соседстве друг с другом в

решётке и вступят в донорно-акцепторное взаимодействие с образованием комплексов и пар. В результате влияние таких образований на физические свойства кристалла будет иным, нежели простая суперпозиция свойств отдельных примесей. Однако, вероятность образования комплексов становится пренебрежимо малой при концентрациях примесей $< 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [5]. Вводимые нами концентрации цинка и сурьмы значительно ниже предела растворимости их в монокристаллах $Ge_{0,9}Si_{0,1}$ ($\approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [7]).

Образцы облучали ускоренными электронами с энергией 5 МэВ (доза варьировалась от 10^{13} до 10^{16} см^{-2}) при комнатной температуре. В контрольных образцах $Ge_{0,9}Si_{0,1}$ без примеси цинка при облучении указанными дозами не обнаруживаются изменения электрических свойств. Взаимодействие примеси цинка с радиационными дефектами изучали по влиянию облучения с различной дозой на электрофизические свойства монокристаллов $Ge_{0,9}Si_{0,1}$.

Установлено, что электрофизические свойства изучаемых кристаллов существенно изменяются под воздействием электронного облучения. Так, на рис. 1 приведены

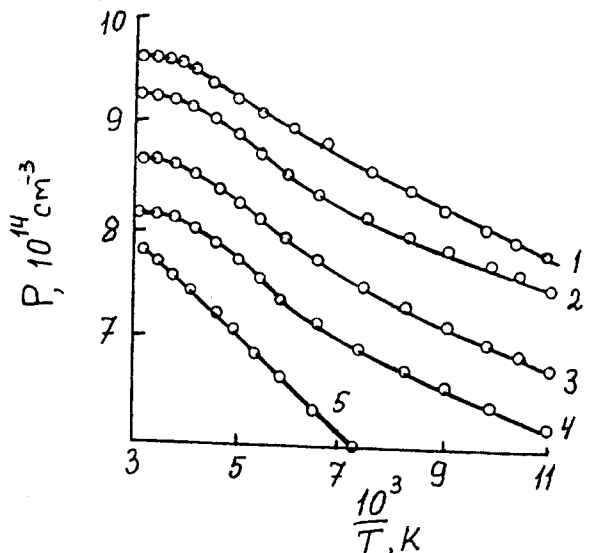


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации дырок в монокристалле $Ge_{0,9}Si_{0,1}$, легированном цинком и сурьмой и облучённом различными дозами электронов (5 МэВ): 1-0; 2- 10^{13} ; 3- 10^{14} ; 4- $5 \cdot 10^{14}$; 5- $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

температурные зависимости концентрации дырок для монокристалла твёрдого раствора $Ge_{0,9}Si_{0,1}$, легированного цинком и сурьмой и облучённого различными дозами. До облучения в кристалле проявляется нижний акцепторный уровень цинка ($E_v+0,05$ эВ). По мере увеличения дозы до $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ концентрация дырок уменьшается. При этом новых уровней радиационного происхождения не обнаруживается. Мы предполагаем, что падение концентрации дырок связано с уменьшением числа атомов цинка в узлах решётки (атомы цинка в узлах решётки являются акцепторами, а в междоузлиях, вероятно, донорами). Максимальная растворимость замещающей примеси цинка в твёрдом растворе Ge-Si $\approx 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при 800°C , тогда как внедрённой на 4 порядка меньше [7], и подобно междоузельной меди и золоту внедрённый цинк может вести себя как донор [8]. Существует мнение, что донорный уровень цинка в твёрдом растворе Ge-Si расположен очень близко к потолку валентной зоны, что затрудняет его экспериментальное обнаружение [7]. При облучении кристалла из-за взаимодействия узловых атомов цинка с радиационными дефектами, по-видимому, осуществляется их переход в междоузлия, и это переводит их из электрически активного в пассивное состояние, и в результате происходит уменьшение концентрации дырок в валентной зоне.

Из рис.1 видно, что при облучении кристалла дозой $4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ проявляется наклон кривой, соответствующий энергии ионизации второго акцепторного уровня цинка $E_v+0,13$ эВ. Этот переход от уровня $E_v+0,05$ эВ к уровню $E_v+0,13$ эВ, очевидно, свидетельствует об изменении соотношения донорных и акцепторных центров в образце.

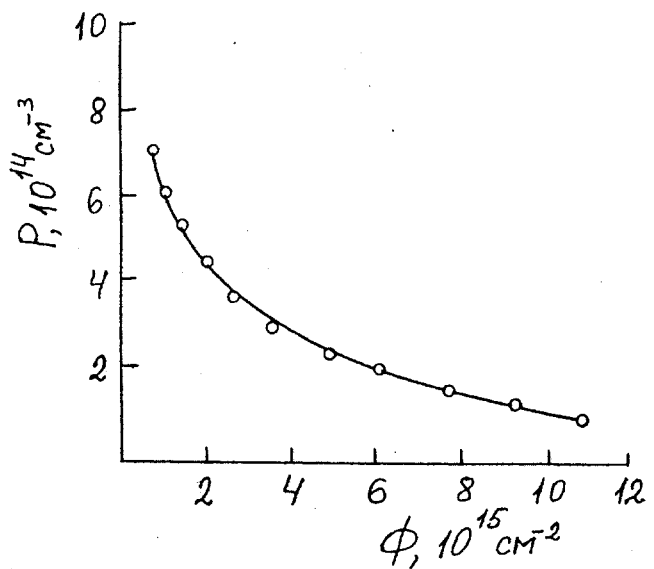


Рис.2. Зависимость концентрации дырок от дозы электронного облучения (5МэВ) для монокристалла $Ge_{0,9}Si_{0,1}$, легированного цинком и сурьмой.

На рис.2 приведена дозовая зависимость концентрации дырок в легированном цинком и сурьмой монокристалле твёрдого раствора $Ge_{0,9}Si_{0,1}$ при температуре, соответствующей истощению нижнего акцепторного уровня цинка. Видно, что на первом этапе облучения до дозы $4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ происходит резкое уменьшение концентрации дырок, что вызвано, по-видимому, переходом атомов цинка из узлов в междоузлия. С дальнейшим повышением дозы до 10^{16} см^{-2} концентрация изменяется слабо.

Был проведён также изохронный отжиг (30 мин.) облучённых образцов в интервале температур $40-300^\circ\text{C}$. Кривая отжига облучённого дозой $4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ образца представлена на рис.3. Видно, что в облучённом $Ge_{0,9}Si_{0,1}$, легированном цинком и сурьмой, наблюдается одна ступень отжига в области $120-180^\circ\text{C}$. На этой стадии увеличивается концентрация дырок. Такой факт можно интерпретировать как возвращение атомов цинка из междоузлий в узлы. Однако на этой стадии отжига исходная концентрация носителей заряда полностью не восстанавливается. В определённой мере это свидетельствует и о том, что часть атомов цинка всё же остаётся в междоузлиях.

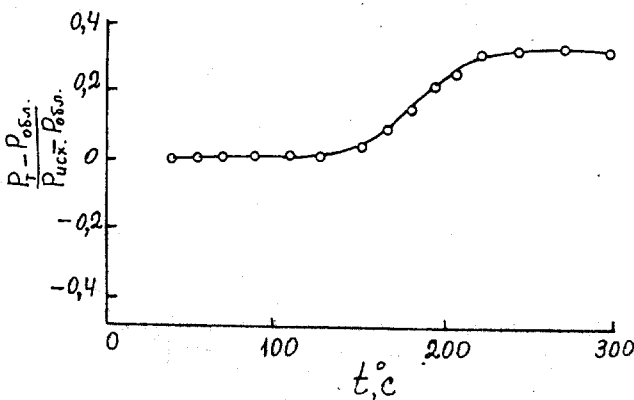


Рис.3. Изменение концентрации дырок при изохронном отжиге облучённого монокристалла $Ge_{0,9}Si_{0,1}$, легированного цинком и сурьмой (5 МэВ, доза $4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, время отжига 30 мин.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при электронном облучении (5 МэВ, дозой $\leq 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) монокристаллов твёрдых растворов $Ge_{0,9}Si_{0,1}$, легированных цинком и сурьмой, концентрация дырок уменьшается, и это, вероятно, связано с переходом атомов цинка из электрически активного состояния в узлах в пассивное в решётке кристалла.

Показано, что изохронный отжиг ($40-300^\circ\text{C}$; 30 мин.) облучённых монокристаллов твёрдых растворов $Ge_{0,9}Si_{0,1}$, легированных цинком и сурьмой, приводит к увеличению концентрации дырок, протекает в одну ступень вблизи 120°C , и в результате осуществляется реактивация примеси цинка.

[1] G.A. Morton, M.L. Schultz, W.E. Harty. RCA Review, 1959, v. 20, № 4, p.599.
 [2] М.Я. Бакиров. Электронные приборы на основе твёрдого раствора Ge-Si. Изд. «Элм», Баку, 1985, с.140.
 [3] М.Г. Кекуа, Э.В. Хуцишвили. Твёрдые растворы полупроводниковой системы германий-кремний. Изд. «Мецниереба», Тбилиси, 1985, с.175.

[4] P.З. Кязимзаде. Основные энергетические состояния примесных центров и электротранспортные явления в $Ge_{1-x}Si_x$. Дис. док. физ.-мат. наук, Баку, 1998, с. 272.
 [5] В.И. Сидоров. ФТТ, 1963, т.5, с.3006.
 [6] В.С. Земсков, И.Н. Белокурова, Л.Д. Добычина. Энергетический спектр цинка в твёрдых растворах германия с кремнием. В книге «Свойства легированных

- полупроводников». Изд. «Наука», Москва, 1977, [8] В.М.Глазов, В.С. Земсков. Физико-химические основы легирования полупроводников, М., «Наука», с.16.
- [7] В.И. Тагиров. Полупроводниковые твёрдые растворы германий-кремний, Баку, «Элм», 1983, с.75.

М.У. Бәкиров, Н.İ. İbrahimov

ՏՆԿ ԱՇՂԱՐԻՆԻ ՆԵ-ՏԻ ԲՅՐԿ ՄՅՆԼՆԼՍ ՄՈՆՈԿՐԻՏԱԼԼԱՐԻՆԴԱ ՐԱԴԻԱՏԻՅԱ ԴԵՖԵԿՏԼՆՐԻԼՆ ԳԱՐՏԻԼԻՂԻ ԹՅՏԻՐԻ

Sink və sürmə ilə aşqarlanmış (konsentrasiyaları $\approx 10^{15} \text{ sm}^{-3}$) $\text{Ge}_{0,9}\text{Si}_{0,1}$ monokristallarında radiasiya defektlərinin termik stabilliyi tədqiq edilmişdir. Otaq temperaturunda 5 MeV enerjili elektronlarla $10^{13}\text{-}5 \times 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ dozalarla şüalandırıldıqda sinkin aşağı akseptor səviyyəsi $E_v+0,05 \text{ eV}$ qalır, lakin dəşiklərin konsentrasiyası xeyli azalır. Şüalandırma dozası $5 \times 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ -dən çox olduqda dəşiklərin konsentrasiyasının azalması davam edir və sinkin ikinci (yuxarı) akseptor səviyyəsi $E_v+0,13 \text{ eV}$ müşahidə olunur. Şüalandırma nəticəsində dəşiklərin konsentrasiyasının azalması sink atomlarının, radiasiya defektləri ilə qarşılıqlı tə'siri nəticəsində, kristal qəfəsində düyünlərdən düyünlər arasına keçməsilə əlaqələndirilir. Göstərilmişdir ki, sinklə aşqarlandırılmış və şüalandırılmış $\text{Ge}_{0,9}\text{Si}_{0,1}$ monokristallarının izoxron termik işlənməsi ($40\pm 300 \text{ }^\circ\text{C}$; 30 dəq.) dəşiklərin konsentrasiyasının artmasına gətirir və bu artım $120 \text{ }^\circ\text{C}$ yaxınlığında birtəplı olur. Ehtimal olunur ki, bu prosesdə sink atomları düyünlər arasından düyünlərə qaydır.

M.Y. Bakirov, N.I. Ibragimov

INTERACTION OF THE ZINC IMPURITY AND RADIATION DEFECTS IN SINGLE CRYSTALS OF SOLID SOLUTION GERMANIUM-SILICON

The thermal stability of radiation defects in single crystals $\text{Ge}_{0,9}\text{Si}_{0,1}$, doped by zinc and antimony ($\approx 10^{15} \text{ sm}^{-3}$) is investigated. In the electron irradiation process with energy 5 MeV in exposure dose interval $10^{13}\text{-}5 \times 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ the lower acceptor zinc level $E_v+0,05 \text{ eV}$ remains, but the hole concentration essentially decreases. The concentration continues to decrease and second acceptor zinc level $E_v+0,13 \text{ eV}$ reveals. It is supposed that the hole concentration decreasing by the irradiation is conditioned by transitions of zinc atoms from site to intersite because of its interaction with radiation defects. It is shown that isochronal thermal treatment ($40\pm 300 \text{ }^\circ\text{C}$; 30 min) of doped by zinc and irradiated single crystals of solid solution $\text{Ge}_{0,9}\text{Si}_{0,1}$ leads to the hole concentration increasing, passes in one stage near $120 \text{ }^\circ\text{C}$ and in this case the zinc atoms return evidently from intersite to site.