

# Кинетика электронных процессов в $\gamma$ -облученных ( $^{60}\text{Co}$ ) монокристаллах $n\text{-Ge}$

© Г.П. Гайдар<sup>¶</sup>

Институт ядерных исследований Национальной академии наук Украины,  
03680 Киев, Украина

(Получена 9 сентября 2013 г. Принята к печати 20 января 2014 г.)

Исследованы изменения основных электрофизических параметров под влиянием  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ) в монокристаллах  $n\text{-Ge}$  с разным уровнем легирования. В определенном концентрационном интервале легирующей примеси обнаружено заметное повышение подвижности носителей заряда в облученных образцах и предложено объяснение природы полученного эффекта. Показано, что изменения подвижности электронов под влиянием  $\gamma$ -облучения, которые возникают в исходных кристаллах  $n\text{-Ge}$  с примесью кислорода и в кристаллах, подвергнутых отжигу, противоположны по знаку. Установлена решающая роль кислородных комплексов, которые образуются в процессе термообработки в образцах, и локальных механических напряжений решетки в окрестности таких комплексов в появлении эффекта радиационно-стимулированного повышения подвижности. Выяснено, что радиационная стойкость подвижности электронов существенным образом зависит от кристаллографической ориентации исследуемых образцов.

## 1. Введение

Известно [1], что в  $n\text{-Ge}$ , легированном мелкой донорной примесью (типа сурьмы или фосфора), холловская подвижность носителей тока  $\mu = R_H \sigma = R_H / \rho$  ( $\rho$  — удельное сопротивление,  $\sigma$  — удельная проводимость), как и коэффициент Холла  $R_H$ , является изотропной в слабых ( $\mu H / c \ll 1$ ) и анизотропной в промежуточных ( $\mu H / c \approx 1$ ) магнитных полях  $H$ .

Однако при легировании Ge донорами другой природы (например, кислородными комплексами, которые возникают в процессе термообработки кристаллов [2]) проявляется ряд особенностей, зависящих, как было показано в работах [3,4], не только от концентрации кислорода, но и от состояния этой примеси в объеме кристалла. Так, например, в работе [3] обнаружено, что, в отличие от Ge с атомарно-диспергированной примесью кислорода, в термически обработанных кристаллах анизотропия рассеяния уменьшается за счет уменьшения под действием радиации ( $\gamma$ -облучение от источника  $^{60}\text{Co}$  при температуре  $30^\circ\text{C}$ ) анизотропно рассеивающих (заряженных) центров. Это в свою очередь приводит к нехарактерному для действия радиации повышению подвижности носителей тока.

С помощью холловских измерений, которые выполнялись на кристаллах кремния  $n$ -типа проводимости, в работе [5] установлено, что  $\gamma$ -облучение и температурные воздействия (типа закалки) приводят к росту подвижности носителей тока в области смешанного рассеяния (температура измерений  $T = 77.4\text{ K}$ ) в их объеме. Этот эффект был объяснен введением в кристаллы, которые облучались (или закаливались), акцепторных центров, частично нейтрализующих заряд ионных остовов, располагающихся в узлах решетки и создающих в ней локальные механические напряжения вследствие размерного несоответствия тетраэдрических радиусов

примесных атомов и атомов решетки. Следовательно, рост подвижности носителей заряда, выявленный в [5], возникает не за счет повышения степени совершенства кристаллов при их термической или радиационной обработке, а за счет снижения эффективности рассеяния носителей тока на примесных ионах при частичной нейтрализации их заряда дефектами решетки, которые образуются под влиянием названных воздействий.

Для объяснения возможных изменений подвижности, хотя и в существенно иных условиях облучения, в литературе высказывались и другие соображения [6].

Установленное в [5] с помощью холловских измерений повышение подвижности носителей тока в образцах  $n$ -кремния в довольно необычных условиях (по сути в условиях термической или радиационной деструкции решетки) необходимо было проверить независимым методом.

Целью данной работы было изучение изменений подвижности основных носителей тока под воздействием  $\gamma$ -радиации в кристаллах  $n\text{-Ge}(\text{As})$  с разным уровнем легирования, в кристаллах  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$  с примесью кислорода в различных состояниях, а также проверка наличия эффекта повышения подвижности носителей заряда путем измерения магнитосопротивления в исходных и термообработанных образцах  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$  до и после  $\gamma$ -облучения.

## 2. Результаты и обсуждение

Поскольку легирующей примесью в первую очередь задаются оптические и электрофизические свойства кристаллов [7–9], необходимо было исследовать, как изменяются последние в некотором интервале легирования в результате  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ) таких кристаллов. Так как кинетику электронных процессов в полупроводниках определяют в основном холловские параметры, именно их и определяли в данной работе.

<sup>¶</sup> E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

**Таблица 1.** Результаты воздействия  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ) кристаллов  $n\text{-Ge}\langle\text{As}\rangle$  на удельное сопротивление  $\rho$  и холловские данные при 77.4 К

Серия образцов	$\rho$ , Ом·см	$R_H$ , см <sup>3</sup> /Кл	$n_e$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	Доза $D$ , 10 <sup>6</sup> Р
1	1.31	$4.16 \cdot 10^4$	$1.50 \cdot 10^{14}$	31 790	0
	1.31	$4.19 \cdot 10^4$	$1.49 \cdot 10^{14}$	32 760	1
	1.31	$4.16 \cdot 10^4$	$1.50 \cdot 10^{14}$	31 980	5
2	0.08	$1.15 \cdot 10^3$	$5.42 \cdot 10^{15}$	15 180	0
	0.08	$1.14 \cdot 10^3$	$5.47 \cdot 10^{15}$	15 130	1
	0.08	$1.15 \cdot 10^3$	$5.45 \cdot 10^{15}$	14 900	5
3	0.03	$0.98 \cdot 10^2$	$6.36 \cdot 10^{16}$	3 690	0
	0.03	$0.96 \cdot 10^2$	$6.47 \cdot 10^{16}$	3 670	1
	0.03	$0.97 \cdot 10^2$	$6.46 \cdot 10^{16}$	3 660	5

Исследовано влияние  $\gamma$ -облучения дозами  $D = 1 \cdot 10^6$  и  $5 \cdot 10^6$  Р на кристаллы  $n\text{-Ge}\langle\text{As}\rangle$  с разным уровнем легирования. Удельное сопротивление  $\rho$ , коэффициент Холла  $R_H$ , концентрацию электронов  $n_e$  и подвижность  $\mu$  определяли в образцах как до, так и после их облучения. Усредненные результаты экспериментов сведены в табл. 1.

Полученные результаты показали, что образцы, изготовленные из слитков с удельным сопротивлением при  $T = 77.4\text{ К}$  от 1.31 до 0.03 Ом·см (из каждого слитка вырезали по 6 образцов), в результате  $\gamma$ -облучения ведут себя качественно по-разному. Оказалось, что в экспериментах с более сильно легированными кристаллами (табл. 1, серии 2 и 3) при обеих дозах облучения проявляется тенденция к изменению концентрации и подвижности в противоположных направлениях. Это обстоятельство в целом определяет неизменность значений удельного сопротивления в данных образцах. Однако при более низком уровне легирования (табл. 1, серия 1) начинает проявляться тенденция к увеличению подвижности вследствие  $\gamma$ -облучения. В германии, вероятно, как и в кремнии [5], имеет место так называемый эффект малых доз, т. е. аномальное возрастание подвижности носителей заряда при облучении малыми дозами  $\gamma$ -квантов в области смешанного рассеяния. Повышение подвижности связано с радиационным введением акцепторных (отрицательно заряженных) центров, которые при малых дозах генерируются преимущественно в окрестностях положительно заряженных ионных островов (где кристаллическая решетка механически локально напряжена вследствие размерного несоответствия тетраэдрических радиусов атомов матрицы и примеси). В результате этого происходит частичная нейтрализация ионных островов, которая приводит к снижению эффективности резерфордовского (примесного) рассеяния носителей тока на частично нейтрализованных центрах и соответственно к некоторому повышению подвижности.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в процессе облучения происходит не только генерация

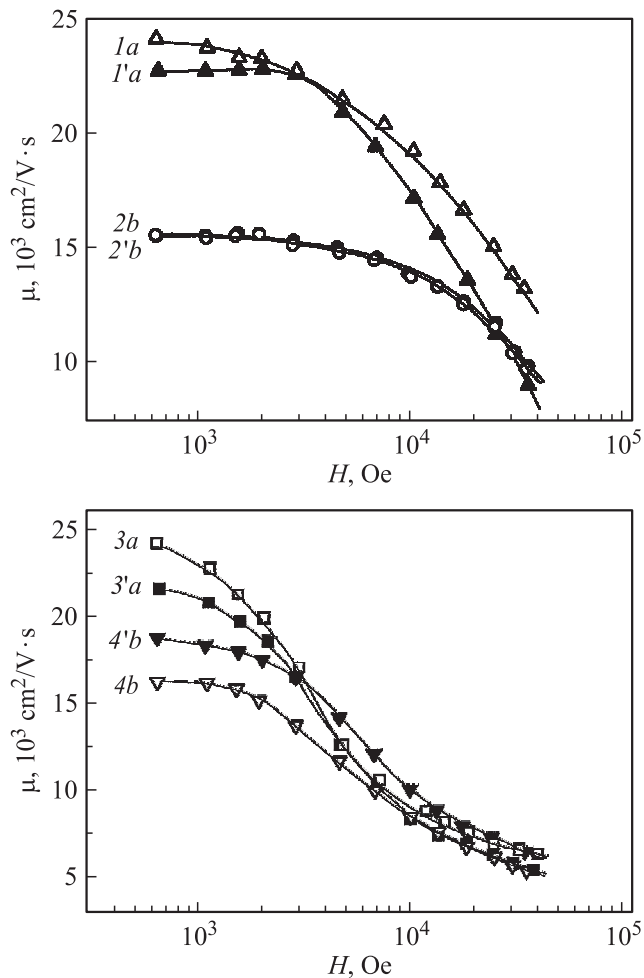
радиационных центров, но она также сопровождается их перестройкой. Перестройка существенно зависит от исходного уровня легирования слитка, из которого изготовлены соответствующие образцы.

Обнаружено также, что индуцированные  $\gamma$ -облучением изменения холловских параметров оказались стабильными при сохранении образцов при комнатной температуре на протяжении полугода.

Особенности кинетических эффектов существенно зависят от состояния, в котором находится остаточная примесь кислорода в кристаллах германия. Об этом свидетельствуют опыты с образцами, приготовленными из слитков  $n\text{-Ge}$ , легированных примесью сурьмы (Sb) через расплав (концентрация сурьмы  $N_{\text{Sb}} = n_e = 1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). В одном из них (исходный слиток *a*) концентрация атомарно-диспергированного кислорода (определенная по спектрам инфракрасного поглощения) составляла  $\sim 1.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Другой слиток, который составлял часть предыдущего, был подвергнут 100-часовой термической обработке в вакууме при  $T_a = 400^\circ\text{C}$  и имел оптически активного кислорода только  $1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (слиток *b*). При этом в термически обработанном указанным выше образом кристалле концентрация носителей увеличилась за счет образования кислородных термодоноров.

Исследования проводились на двух группах образцов (по 4 образца в каждой): *a* — исходные, *b* — отожженные образцы. Все образцы вырезались в направлении [110]. Ток  $\mathbf{J}$  и магнитное поле  $\mathbf{H}$  в образцах, вырезанных из слитков *a* и *b*, были направлены следующим образом:  $\mathbf{J} \parallel [110]$ ,  $\mathbf{H} \parallel [001]$  (кривые *1a*, *1'a*, *2b*, *2'b*),  $\mathbf{J} \parallel [110]$ ,  $\mathbf{H} \parallel [1\bar{1}0]$  (кривые *3a*, *3'a*, *4b*, *4'b*). Для этих двух ориентаций на рис. 1 соответственно в верхней и нижней частях приведены зависимости холловской подвижности от напряженности магнитного поля как до, так и после  $\gamma$ -облучения дозой  $D = 1.23 \cdot 10^8$  Р для исходных (*a*) и термообработанных (*b*) образцов.

Из рис. 1 видно, что подвижность носителей заряда в кристалле  $n\text{-Ge}$ , который был отожжен в течение 100 ч



**Рис. 1.** Зависимости  $\mu(H)$  исходных ( $1a, 1'a, 3a, 3'a$ ) и термообработанных при  $400^\circ\text{C}$  в течение 100 ч ( $2b, 2'b, 4b, 4'b$ ) кристаллов  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$  до ( $1a, 3a, 2b, 4b$ ) и после ( $1'a, 3'a, 2'b, 4'b$ )  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ) дозой  $1.23 \cdot 10^8 \text{ P}$ . Направление тока и магнитного поля: вверху ( $1a, 1'a, 2b, 2'b$ ) —  $\mathbf{J} \parallel [110], \mathbf{H} \parallel [001]$ ; внизу ( $3a, 3'a, 4b, 4'b$ ) —  $\mathbf{J} \parallel [110], \mathbf{H} \parallel [1\bar{1}0]$ .

при  $T_a = 400^\circ\text{C}$ , малочувствительна к  $\gamma$ -облучению во всем диапазоне использованных напряженностей магнитного поля  $\mathbf{H}$  (кривые  $2b$  и  $2'b$  практически совпадают между собой).

Интересной особенностью оказалось также и то (рис. 1), что подвижность в неотожженном образце претерпела существенные изменения (под влиянием облучения) только в слабых и сильных магнитных полях  $H$ , тогда как в области промежуточных  $H$  этот параметр по отношению к использованным дозам  $\gamma$ -облучения оказался практически нечувствительным.

Однако в обоих типах образцов снижение подвижности носителей с повышением напряженности магнитного поля как в их исходном состоянии, так и после  $\gamma$ -облучения оказалось прогрессирующе спадающим.

Из результатов проведенных измерений (рис. 1) можно сделать следующие выводы. В общем случае холловская подвижность носителей в кристаллах германия

с примесью кислорода является радиационно малоустойчивой, причем изменения подвижности электронов под воздействием  $\gamma$ -облучения (доза  $D = 1.23 \cdot 10^8 \text{ P}$ ), возникающие в исходных кристаллах и в кристаллах, которые подвергались термоотжигу, противоположны по знаку, а именно: в исходных кристаллах  $\text{Ge}$   $n$ -типа проводимости с атомарно-диспергированной (электрически нейтральной) примесью кислорода подвижность электронов под воздействием  $\gamma$ -облучения уменьшается, в то время как в кристаллах германия с электрически активными кислородными комплексами (возникающими в результате термообработки при  $T_a = 400^\circ\text{C}$  в течение 100 ч) подвижность электронов (под влиянием той же дозы  $\gamma$ -облучения) возрастает. Это свидетельствует о решающей роли кислородных комплексов, которые образуются в процессе отжига, и локальных механических напряжений решетки в окрестности таких комплексов в появлении эффекта радиационно-стимулированного повышения подвижности.

Из сравнения кривых в верхней и нижней частях рис. 1 видно, что абсолютная величина изменения холловской подвижности вследствие  $\gamma$ -облучения германия с примесью кислорода существенно зависит от кристаллографической ориентации исследуемых образцов. Оказалось, что как в случае исходных кристаллов, так и в случае кристаллов, подвергавшихся термоотжигу, радиационная стойкость подвижности электронов в образцах типов  $1a$  и  $2b$  намного выше, чем в образцах типов  $3a$  и  $4b$  (рис. 1).

На образцах  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$ , вырезанных из слитков  $a$  и  $b$ , измерялось также удельное сопротивление в магнитном поле как до, так и после  $\gamma$ -облучения (доза  $D = 1.23 \cdot 10^8 \text{ P}$ ), поскольку эффект магнитосопротивления, как известно [10], весьма чувствителен к механизмам рассеяния носителей тока в кристаллах. Усредненные данные основных параметров термически обработанных образцов  $n\text{-Ge}$  (группа  $b$ ) представлены в табл. 2.

Для образцов, характерные параметры которых приведены в табл. 2, были измерены при  $T = 77.4 \text{ K}$  изменения удельного сопротивления  $\rho = \rho(H)$  в интервале  $0 < H < 35 \text{ кЭ}$ , и они приведены на рис. 2 в виде полевой зависимости продольного магнитосопротивления  $\lg(\Delta\rho_{\parallel}^H/\rho_0) = f(\lg H)$ .

В области квадратичного изменения  $\Delta\rho_{\parallel}^H/\rho_0$  с  $H$  (где  $\mu H \ll 1$ ) наблюдается корреляция изменений подвижности с изменениями магнитосопротивления под влиянием  $\gamma$ -облучения не только там, где это облучение приводит к привычному (здесь не приводим его) снижению подвижности (кривые  $1, 1'$  на рис. 2), но и там, где радиационная обработка (которая обычно снижает кристаллическое качество образца) обеспечивает ее рост (см. табл. 2 и кривые  $2, 2'$  на рис. 2).

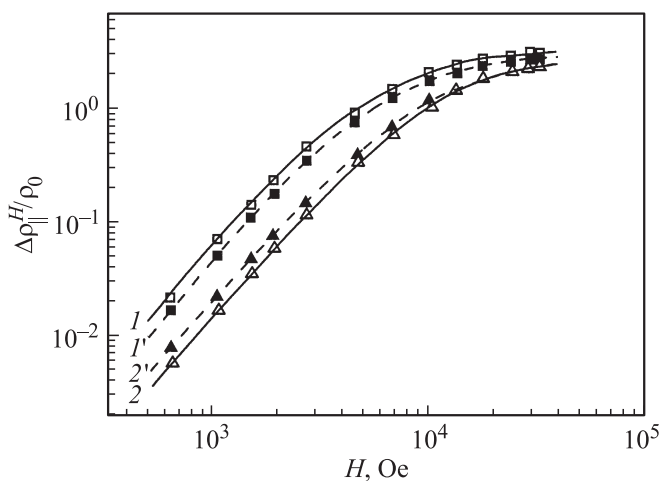
В термически не обработанных образцах, т.е. в образцах, которые не содержат кислородных комплексов и повышенных механических локальных напряжений,

**Таблица 2.** Характерные параметры термически обработанных образцов  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$  (группа  $b$ ) до и после  $\gamma$ -облучения дозой  $D = 1.23 \cdot 10^8 \text{ P}$ , полученные при  $T = 77.4 \text{ K}$

До облучения (кривая 2 на рис. 2)			После облучения (кривая 2' на рис. 2)		
$\rho$ , Ом·см	$n_e$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	$\rho$ , Ом·см	$n_e$ , см <sup>-3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с
0.137	$2.0 \cdot 10^{15}$	15900	0.16	$1.6 \cdot 10^{15}$	17100

использованная в опытах совсем не оптимальная доза облучения  $D = 1.23 \cdot 10^8 \text{ P}$  приводила к привычному для радиационных обработок снижению подвижности носителей тока, которое превышало по величине ожидаемый эффект увеличения подвижности за счет частичной нейтрализации центров, выступающих в роли рассеивателей. Поэтому радиационно-стимулированное повышение подвижности проявлялось лишь в опытах с образцами, которые прошли термообработку (группа  $b$ ), что указывает на решающую роль в проявлении эффекта радиационно-стимулированного повышения подвижности (за счет введения точечных дефектов акцепторного типа) локальных механических напряжений, которые, безусловно, выше в образцах группы  $b$  по сравнению с исходными кристаллами группы  $a$ , в которых примесь кислорода оставалась в основном атомарно-диспергированной.

Заметное сближение (и даже тенденция к слиянию или пересечению) кривых на рис. 2 в области  $H \approx 20\text{--}30 \text{ кЭ}$ , вероятно, связано с проявлением остаточных несовершенств реальных кристаллов, к которым, как известно [1], эффект магнитосопротивления в области классически сильных магнитных полей весьма чувствителен.



**Рис. 2.** Зависимости удельного магнитосопротивления  $\Delta\rho_{||}^H/\rho_0$  исходных (1, 1') и термообработанных при  $T_a = 400^\circ\text{C}$  в течение 100 ч (2, 2') кристаллов  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$  до (1, 2) и после (1', 2')  $\gamma$ -облучения от напряженности магнитного поля  $H$ .  $\mathbf{J} \parallel \mathbf{H} \parallel [001]$ .

### 3. Заключение

Обнаружено, что при  $\gamma$ -облучении монокристаллов  $n\text{-Ge}(\text{As})$  более высокого уровня легирования,  $\sim (10^{15}\text{--}10^{16}) \text{ см}^{-3}$ , когда концентрация носителей  $n_e$  проявляет тенденцию к некоторому повышению под влиянием  $\gamma$ -радиации, подвижность носителей при 77.4 K только снижается. При более низком уровне легирования  $n\text{-Ge}$  ( $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) при тех же дозах  $\gamma$ -облучения  $\sim (1\text{--}5) \cdot 10^6 \text{ P}$  подвижность носителей заряда заметно возрастает по сравнению с подвижностью носителей в исходных (необлученных) кристаллах. Такое необычное поведение подвижности носителей заряда связано, вероятно, со спецификой взаимодействия радиационных центров с ионами легирующей примеси, качественно различной в кристаллах  $n\text{-Ge}$  с разным уровнем легирования, поскольку от этого существенно зависит эффективность экранирования ионных остовов радиационными центрами, вводимыми в кристалл при его  $\gamma$ -облучении, а следовательно, и подвижность носителей заряда в его объеме.

Выявлено, что в отожженных кристаллах  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$  (при  $\mathbf{J} \parallel [110]$ ,  $\mathbf{H} \parallel [001]$ ) подвижность носителей заряда малочувствительна к  $\gamma$ -облучению ( $^{60}\text{Co}$ ,  $D = 1.23 \cdot 10^8 \text{ P}$ ) во всем диапазоне использованных напряженностей магнитного поля  $H$ . В неотожженных образцах  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$  подвижность претерпевала существенные изменения под влиянием облучения, однако только в слабых и сильных магнитных полях, тогда как в области промежуточных  $H$  подвижность при той же использованной дозе  $\gamma$ -облучения оставалась практически неизменной.

Установлено, что изменения подвижности электронов под воздействием  $\gamma$ -облучения ( $^{60}\text{Co}$ ,  $D = 1.23 \cdot 10^8 \text{ P}$ ), которые возникают в исходных и термообработанных кристаллах  $n\text{-Ge}(\text{Sb})$  (при  $\mathbf{J} \parallel [110]$ ,  $\mathbf{H} \parallel [1\bar{1}0]$ ), являются противоположными по знаку: в исходных образцах с атомарно-диспергированной примесью кислорода подвижность электронов под воздействием  $\gamma$ -облучения уменьшается, а в кристаллах с электрически активными кислородными комплексами (возникающими в результате термообработки при  $T_a = 400^\circ\text{C}$  в течение 100 ч) подвижность электронов под влиянием той же дозы  $\gamma$ -облучения возрастает.

Показано, что радиационная стойкость подвижности электронов существенно зависит от кристаллографической ориентации исследуемых образцов (в образцах

типов *1a, 2b* намного выше, чем в образцах типов *3a, 4b*), что может быть практически полезным как при разработке, так и при эксплуатации определенного класса радиационно-устойчивых полупроводниковых приборов.

Автор выражает искреннюю благодарность проф. П.И. Баранскому за проявленный интерес к работе и полезное обсуждение полученных результатов.

## Список литературы

- [1] A.C. Beer. *Galvanomagnetic Effects in Semiconductors* (N.Y.–London, Academic Press Inc., 1963).
- [2] C.S. Fuller, W. Kaiser, C.D. Thurmond. *J. Phys. Chem. Sol.*, **17** (3–4), 301 (1961).
- [3] П.И. Баранский, В.В. Гайдученко, В.О. Шершель. *УФЖ*, **15** (7), 1192 (1970).
- [4] V.M. Babich, P.I. Baranskii, V.A. Shershel. *Phys. Status. Solidi*, **42** (1), K23 (1970).
- [5] Е.Н. Видалко, Г.П. Гайдар, В.А. Гирий. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **22** (4), 533 (1986).
- [6] В.В. Емцев, М.И. Клиnger, Т.В. Машовец. *Письма ЖЭТФ*, **19** (9), 575 (1974).
- [7] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашов. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М., Наука, 1990).
- [8] А.А. Гроза, П.Г. Литовченко, М.И. Старчик. *Эффекты радиации в инфракрасном поглощении и структуре кремния* (Киев, Наук. думка, 2006) (на укр.).
- [9] В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. *Действие излучений на полупроводники* (М., Наука, 1988).
- [10] П.И. Баранский, И.С. Буда, И.В. Даховский, В.В. Коломоец. *Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1977).

Редактор Л.В. Шаронова

## The kinetics of electron processes in $\gamma$ -irradiated ( $^{60}\text{Co}$ ) $n$ -Ge single crystals

G.P. Gaidar

Institute for Nuclear Research,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
03680 Kyiv, Ukraine

**Abstract** The changes in the main electrical parameters under the influence of  $\gamma$ -irradiation ( $^{60}\text{Co}$ ) of  $n$ -Ge single crystals at various levels of doping were investigated. The significant increase in the charge carriers mobility in the irradiated samples was found in a certain concentration range of the dopant and the explanation of the obtained effect nature was proposed. It was shown that changes in the mobility of electrons under the influence of  $\gamma$ -irradiation in the initial  $n$ -Ge crystals with oxygen impurity and in the annealed crystals were opposite in sign. The decisive role of the oxygen complexes, formed under the heat treatment in the samples, and of the local mechanical stresses of the lattice in the vicinity of these complexes for the appearance of the effect of radiation-stimulated increase of the mobility was established. It was found that the radiation hardness of the electron mobility strongly depends on the crystallographic orientation of the investigated samples.