**Российская Академия Наук**

Сибирское отделение

Институт физики полупроводников

**Реферат**

к сдаче кандидатского экзамена

по специальности 01.04.10

“Физика полупроводников”

на тему:

**“ Определение времени жизни носителей в высокоомном кремнии.**

**Влияние времени жизни на параметры высоковольтных приборов на кремнии.”**

Чернявский Е. В. Научный руководитель:

к.ф-м. н. Попов В.П.

# Новосибирск - 1999

**Содержание:**

## Введение

1. Обзор литературы

2. Определение времени жизни по стандарту ASTM F28-91

3. Механизмы рекомбинации

4. Выводы

Введение

Для биполярных приборов, работа которых связана с инжекцией неосновных носителей, особенно для приборов, работающих в области высоких напряжений, врямя жизни носителей чрезвычайно важно для таких параметров как: падение напряжения в открытом состоянии , динамические характеристики, поткри при выключении. Обычно компромисс между этими конкурирующими параметрами достигается путём облучения электронами, протонами или легированием примесями , дающими глубокие уровни в кремнии. Также время жизни является важным параметром для характеризации высокоомного кремния , его структурного совершенства. В связи с этим измерения времени жизни, возможность его регулирования представляет большой практический интерес.

1. Обзор литературы.

Для многих приборов, таких как высоковольтные тиристоры, необходим

большой температурный диапазон работы, в пределах 40° С - 125° С. Поэтому изменение времени жизни носителей в зависимости от температуры может оказать существенное влияние на характеристики прибора.

 В программах моделирования полупроводниковых приборов

( одномерных [1], двумерных [2]) решаются стандартные уравнения диффузионно – дрейфового приближения [3]. Обычно применяется модель рекомбинации Шокли – Холла - Рида [4] для одного уровня в запрещённой зоне. Время жизни для электронов и дырок в этой модели описывается как

τр=1 /σpVthNt τn=1 /σnVthNt  (1.1)

где:

 Nt – концентрация рекомбинационных центров.

 Vth = (3kT/m)1/2≈ 107 см/сек – тепловая скорость носителей

 σp , σn – сечение захвата электронов и дырок соответственно.

В пренебрежении зависимостью σp , σn  от температуры это позволяет предположить, что τn,р меняется с температурой как Т-1/2. Многочисленные исследования [5], [6], [7], показывают, что температурная зависимость τn,р существенно сильнее. Согласно [7] температурная зависимость времени жизни определяется как:

τр ~T2.8 τn ~T2.2 (1.2)

Кроме того, при моделировании приборов необходимо учитывать зависимость времени жизни от концентрации акцепторной и донорной примеси. Такая зависимость рассмотрена в [8]. Она определяется формулой :

τn,p(x) = τn,p / (1+( {Na(x)+Nd(x)}/3\*1015 )1/2 ) (1.3)

 В работе [9] проводилось 2-х мерное моделирование зависимости тока управляющего электрода в GTO (Gate Turn Off thyristor) от температуры. В этой работе использовалась модель подвижности Даркеля и Летурка [8], в которой учитываются эффекты рассеяния носителей заряда на носителях, возникающие при высоких уровнях инжекции. Также была модифицирована температурная зависимость подвижности носителей. Были добавлены учет диссипации энергии при протекании тока и учет энергии рекомбинации. Дополнительно к сокращению времени жизни в высоколегированных областях ( по Шарфеттеру) n-эмиттера использовался коэффициент 0,8 учитывающий эффекты геттерирования и коэффициент 0,3 в высоколегированных слоях р-эмиттера , учитывающий вжигание аллюминиевой металлизации на анодном контакте. Рассчитанный по этой модели ток сравнивался с экспериментом. Полученная таким образом зависимость времени жизни приведена на рис. 1.1

Рис. 1.1. Температурная зависимость времени жизни по [9]

В температурном диапазоне 25° С - 125° С наблюдается линейный рост времени жизни в зависимости от температуры.

 В сязи с массовым выпуском IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), GTO встает вопрос о быстром и надежно тестировании времени жизни носителей непосредственно на кристалле прибора. В работах [10] , [11], [12] рассматривается вопрос о использовании для этой цели p-i-n диодов. В работе [13] приводится пример тестовой структуры , изготавливаемой непосредственно на кристалле IGBT, применяемой для контроля времени жизни. Приведены вольт – амперная характеристика и значения падения напряжения на диоде в зависимости от времени жизни в n— базе. Максимальная плотность тока в диоде 100 А/см2. Тестируемые значения времени жизни от 4 до 100 μсек. Определенные времена жизни по падению напряжения проверялись по методу восстановления обратно смещенного диода.

Однако площадь тестовых элементов, расположенных на скрайбовой дорожке кристалла может оказаться мала для уверенного определения времени жизни. В лаб. 10 ИФП СО РАН разработан метод, позволяющий определять время жизни на рабочих структурах МСТ после дополнительных технологических обработок [14]. Применяемый метод – восстановление обратно смещенного диода. В качестве катода использовался Р-карман над которым расположен контакт к затвору тиристора. В процессе измерений сравнивались кристаллы МСТ, изготовленные по одному технологическому маршруту на двух предприятиях – АО “Ангстрем” и АО “Восток”. Средние значения времени жизни составили – 40,3 мкс (АО “Ангстрем”) и 11,6 мкс (АО “Восток”). Из сравнения времен жизни видно, насколько важна технологическая чистота процессов, используемых при изготовлении высоковольтных приборов. Недостатком метода является то, что этот метод – разрушающий.

Так как время жизни жизни в высокомной базе определяет такую важную характеристику прибора как , как потери энергии во время выключения прибора, то в литературе уделяется большое внимание регулированию этого параметра. В качестве одного из методов применяется облучение протонами эмиттерной (анодной) стороны прибора [15]. Эта технология позволяет уменьшить потери при выключении прибора путем введения большого числа рекомбинационных центров и уменьшения времени жизни носителей в базовой области , примыкающей к аноду. В работе [16] в качестве примера рассматривался IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) c напряжением блокирования 4,5 кВ. Для облучения применялись протоны с дозами 5⋅1011 см-2 и 7⋅1011 см-2. Об энергиях протонов в статье не сообщается, но по глубине залегания радиационных дефектов можно сказать, что она не менее 2 МэВ. Падения напряжения в открытом состоянии составили не менее 4,7 и 5,4 В соответственно при плотности тока 100 А/см2. Потери энергии при выключении составили 35 mДж/см2 и 25 mДж/см2. Однако при повышении дозы облучения на ВАХ появлется участок с отрицательным динамическим сопротивлением, что приводит к осцилляциям тока и ухудшению характеристик прибора. В статье [16] указано на необходимость точного подбора дозы облучения.

Регулирование времени жизни представляет интерес не только с точки зрения его уменьшение. Падение напряжения в низколегированой области зависит от величины времени жизни. В процессе технологических обработок пластины загрязняются примесями, многие из которых представляют из себя рекомбинационные центры. Поэтому встаёт вопрос о геттерировании таких примесей в процессе технологических обработок с целью повышения времени жизни носителей. Вопросы геттерирования подробно рассмотрены в [17] .

2. Определение времени жизни по стандарту ASTM F28-91

 Cтандарт ASTM F28-91 определяет порядок и условия определения обьемного времени жизни носителей в германии и в кремнии. Эта стандарт основан на измерении спада импульсного тока вызванного импульсной засветкой образца.

Другие стандарты измерения времени жизни:

 1) DIN 50440/1 “Измерение времени жизни в монокристаллах кремния на основе спада фототока”

 2) IEEE Standart 255 “Измерение времени жизни неосновных носителей в кремнии и германии на основе спада фототока ”.

Стандарт ASTM F28-91 определяет три типа образцов, применяемых при измерениях. Типы образцов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Размеры образцов, применяемых при измерениях.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Тип образца | Длина, мм | Ширина, мм | Высота, мм |
| A | 15,0 | 2,5 | 2,5 |
| B | 25,0 | 5,0 | 5,0 |
| C | 25,0 | 10,0 | 10,0 |

Таблица 2.2 Максимально допустимые обьемные времена жизни неосновных носителей для разных полупроводников и образцов , μсек.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Материал | Тип А | Тип B | Тип C |
| p-тип германий | 32 | 125 | 460 |
| n-тип германий | 64 | 250 | 950 |
| n-тип кремний | 90 | 350 | 1300 |
| р-тип кремний | 240 | 1000 | 3800 |

Таблица 2.3. Темп поверхностной рекомбинации для разных полупроводников и типов образцов, Rs , μS-1.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Материал | Тип А | Тип B | Тип C |
| p-тип германий | 0,03230 | 0.00813 | 0.00215 |
| n-тип германий | 0.01575 | 0.00396 | 0,00105 |
| n-тип кремний | 0,01120 | 0,00282 | 0,00075 |
| р-тип кремний | 0,00420 | 0,00105 | 0,00028 |

 После засветки образца импульсом света напряжение на образце меняется по закону:

ΔV=ΔV0exp(-t/τf) (2.1)

 где:

 ΔV – напряжение на образце

ΔV0 - максимальная амплитуда напряжения на образце

t - время

τf - измеренное время экспоненциального спада.

 В силу нескольких причин экспоненциальная форма сигнала (2.1) может быть искажена. Это может быть обусловлено как поверхностной рекомбинацией , скорость которой много выше обьемной, так и наличия глубоких уровней, на которых могут захватыватся носители. Устранение влияния поверхностной рекомбинации достигается 2 методами:

1. Использованием длины волны излучения, возбуждающего носители

больше 1 мкм (для этого применяются фильтры см. рис. 2.1.)

1. Использование образца соответствующих размеров (см. Таблицу 2.3)

Для устранения прилипания носителей используются два метода:

1. Нагревание образца до 70 °С
2. Фоновая постоянная подсветка образца.

Однако при использовании температурного метода необходимо иметь в виду, что время жизни сильно зависит от температуры образца ( ~ 1% на градус).

Поэтому при сравнении времен жизни на нескольких образцах необходимо следить, чтобы температурные условия измерений были одинаковы.

 Кроме того необходимо удостоверится, что в проводимости учавствуют носители, воникшие в результате возбуждения импульсом света. Для этого напряжение смещения Vdc, поданное на измеряемый образец должно удовлетворять требованию:

Vdc ≤ (106⋅Lc⋅L)/(500⋅μ⋅τf) (2.2)

Где :

Lc – растояние от края области засветки образца до области контакта , мм

L – длина образца , мм

τf - измеренное время экспоненциального спада, μS.

μ - - подвижность неосновных носителей, см2/В⋅сек

Экспоненциальный спад тока фотопроводимости соответствует времени жизни в случае , если уровень инжекции фототока мал в сравнении с уровнем инжекции тока, протекающего под действием потенциала смещения. Это требование удовлетворено в случае выполнения соотношения:

ΔV0/Vdc ≤ 0.01 (2.3)

Если это условие не выполнено, то следует внести поправку в экспоненциальный спад тока фотопроводимости по формуле:

τf = τf изм⋅[ 1- (ΔV0/Vdc) ] (2.4)

Где:

 τf изм - экспоненциальный спад тока фотопроводимости

 τf - экспоненциальный спад тока фотопроводимости после внесения поправки

После внесения этой поправки объемное время жизни неосновных носителей вычисляется по формуле :

τ0 = (τf-1 – Rs)-1 (2.5)

 Где Rs определяется из таблицы 2.3.

Стандартом ASTM F28 – 91 при выполнении вышеперечиленых условий устанавливается погрешность ±50% для измерений на германиевых образцах и ±135% для измерений на кремниевых образцах.

Рис. 2.1. Блок схема установки по измерению времени жизни фотоэлектирическим методом.

3. Механизмы рекомбинации

По виду передачи энергии рекомбинирующих частиц различают три основных типа рекомбинации.

1. Рекомбинация называется излучательной, или фотонной, если энергия рекомбинирующих частиц выделяется в виде энергии фотона.
2. Если энергия частицы передаётся решетке (фононам) , то рекомбинация называется безизлучательной, или фононной.
3. Одним из видов безизлучательной рекомбинации является ударнaя ионизация ( процессы Оже ), когда энергия рекомбинирующих частиц передается третьей частице , которая благодаря этому становиться “горячей”. “Горячая” частица в результате нескольких столкновений передает свою энергию фононам.

Помимо этих трех основных механизмов, энергия рекомбинирующих частиц может передаваться электронному газу ( плазменная рекомбинация ). Если электрон и дырка образуют в качестве промежуточного состояния экситон, то такая рекомбинация носит название экситонной.

Фотонная, фононная и рекомбинация Оже могут протекать по разному в зависимости от механизма перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону. Если частицы рекомбинируют в результате непосредственной встречи электрона и дырки, то такая рекомбинация называется прямой, или межзонной. Прямая рекомбинация играет роль в полупроводниках с малой шириной запрещенной зоны порядка 0,2 – 0,3 эВ и меньше.

Если ширина запрещенной зоны больше 0,5 эВ , то рекомбинация происходит через локализованные состояния , лежащие в запрещенной зоне. Эти сосстояния обычно называются рекомбинационными ловушками.

Предположим, что в полупроводнике имеются дефекты уровни энергии которых лежат в запрещенной зоне , а уровень энергии Et не занят электроном (дыркой). Возможен целый ряд процессов, схематически изображенных на

Рис. 3.1.

Рис. 3.1. Схемы рекомбинации носителей. Ес –дно зоны проводимости, Et – уровень в середине запрещённой зоны, Еv – уровень валентной зоны.

а)- нейтральный дефект захватывает свободную дырку

б)- отрицательно заряженый дефект отдает электрон в зону проводимости. Таким образом, электрон , побыв некоторое время

на уровне дефекта, вновь становится свободным. Если дефект с уровнем энергии Et осуществляет захват свободных электронов с последующим их освобождением , то он называется ловушкой захвата электрона;

 в)- нейтральный дефект захватывает свободную дырку ( отдает электрон валентной зоне);

г)- положительно заряженый дефект захватывает электрон из валентной зоны; такой дефект называется ловушкой захвата дырки;

д)- захватив электрон из зоны проводимости, отрицательно заряженый дефект захватывает свободную дырку – отдаёт захваченый электрон в валентную зону. Происходит процесс рекомбинации пары электрон - дырка;

е)- захватив свободную дырку, положительно заряженый дефект захватывает свободный электрон, превращаясь в нейтральный дефект. Происходит процесс рекомбинации свободной пары электрон – дырка.

Захват носителей заряда не влияет на стационарное время жизни,

но оказывает влияние на мгновенное время жизни. Освобождение захваченного носителя заряда может быть вызвано тепловым перебросом.

В некоторых случаях это происходит в результате подсветки.

**4. Выводы**

 В связи с бурным развитием силовой электроники в последнее время проявляется повышенный интерес к высокоомному кремнию. Высокоомный кремний является материалом для таких приборов как IGBT, GTO, IGCT, MCT. Поэтому контроль времени жизни в кремнии, возможность его регулирования в заданных пределах предсталяет большой практический интерес.

**Литература:**

1. W.L. Engl, R. Laur and K. Dirks, IEEE, CAD-1,85, 1982

2. Technology Modeling Associates. Inc.Palo Alto,California. USA, MEDICI user’s manual. March 1992

3. W. Van Robosbroek, Bell System Technical Journal, 29 , 560 , 1950

4. W. Shokley and T.W. Read, Physical Review 87, pp. 835-842, 1952 ; R. N. Hall, Physical Review 87, 387, 1952.

5. M. S. Tiyagi, R. Van Oberstaen, Minority carrier recombination in in heavily doped silicon. Solid State Elrctronics, Vol. 26, No. 6, pp. 577-597, 1983

6. A.G. Milnes, Deep Impurities in Semiconductors, Wiley, New York, 1973.

7. I.V. Grekhov, N.N Korotkov and A.E. Otbelsk, Soviet Physics Semicond., 12, 184 , 1977.

8. J. M. Dorkel, Ph. Lecturcq, Solid – State Electronics, Vol. 24, pp. 821 –825, 1981.

9. Y.G. Gerstenmaier, Proc. Of the 6th Internat. Symposium on Power

Semiconductor Devices & IC’s, Davos, Switzerland, May 31 – June2, pp. 271 –274 ,1994

10. Ichiro Omura and Akio Nakagava, Proc. Of 1995 ISPSD, pp. 422-426, 1995, Yokohama.

11. Olof Tornblad et al, Proc. Of 1995 ISPSD, pp. 380-384, 1995, Yokohama.

12. Thomas Flohr and Reinhard Helbig, IEEE Transactions on Electron Devices Vol. 37, No. 9 Sept., pp. 2076-2079, 1990.

13. Shinji Aono, Tetsuo Takahashi, Katsumi Nakamura, Hideki Nakamura, Akio Uenishi, Masana Harada. A simple and effective lifetime evaluation method with diode test structures in IGBT. // IEEE Trans. On Electron. Dev. n.2, pp. 117-120, 1997.

14. Годовой отчет по интеграционному проекту. ИФП СО РАН, 1997.

15. M. W. Huppi, Proton irradiation of silicon : Complete electrical characterization of the induced recombination centers, Jour. Applied Physics, vol. 68, pp 2708-2707, 1990.

16. Simon Eicher, Tsuneo Okura, Koichi Sugoyama, Hideki Ninomiya, Hiromichi Ohashi, Advanced Lifetime Control for reducing turn-off swithing losses of 4.5 kV IEGT devices, Proc. Of 1998 International Symposium on Power Srmiconductor Devices & IC’s, Kyoto, 1998.

17. Яновская С.Г., Реферат “ Формирование и геттерирующие свойства нитридных преципитатов в слоях Si, имплантированных ионами азота.”, ИФП СО РАН, 1997.