



Волков А.Н.

АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДЛИННО-КАНАЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТЕПЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ СРОКА СЛУЖБЫ t_L ОТ ТОКА ПОДЛОЖКИ I_{SUB}

В работе исследовано влияние конструктивно-технологических параметров полевых металл-оксид-полупроводник-транзисторов (МОПТ) на прогнозирование надежности в степенной зависимости срока службы t_L от тока подложки I_{sub} . Найдены конструктивно-технологические параметры, способные влиять на деградацию приборных характеристик МОПТ, вызванную инжекцией горячих носителей. Автор выражает благодарность научному руководителю, д.т.н., профессору Коробову А.И. за поддержку настоящей работы и ряд важных замечаний.

Ключевые слова: прогнозирование надежности, срок службы, ток подложки, инжекция горячих носителей.

1. Введение

Существует несколько различных способов прогнозирования надежности (срока службы) электронных приборов. Одним из таких способов является прогнозирование срока службы МОПТ методом ускоренных испытаний. Данный метод основан на проведении ускоренных испытаний по определению работоспособности интегральных схем с выбором критерия отказа и характерных зависимостей срока службы от тока подложки. В работе [1] автор приводит зависимости статистического подхода к прогнозу срока службы методом ускоренных испытаний. Срок службы или время жизни можно определить по эмпирической формуле:

$$t_L = B \times (I_{sub}/W)^{-\nu}, \quad (1)$$

где B — коэффициент, который определяется многими конструктивно-технологическими параметрами; ν — параметр, определяющий наклон прямой графика, который строится по результатам ускоренных испытаний. В работе [1] было показано, что процесс генерации ловушек в МОПТ структурах может происходить при помощи двух механизмов: 1) взаимодействие горячих электронов и горячих дырок с границей раздела Si-SiO₂; 2) обрыв связей Si-H в подзатворном окисле. В первом случае поверхностные ловушки образуются в результате вторичной ударной ионизации. Во втором случае рекомбинация электронов с дырками приводит к высвобождению энергии, достаточной для разрыва связи Si-H и образования ловушки. В работе [2] автор предлагает общую модель для эффектов горячих носителей и полагает $\nu = \phi_{it}/\phi_i$, где ϕ_i — минимальная энергия в электрон-вольтах, которую горячие электроны должны приобрести для создания ударной ионизации, а ϕ_{it} —

критическая энергия, которой электрон должен обладать для того, чтобы создать поверхностную ловушку. Таким образом, коэффициент ν не просто показывает наклон прямых, но и позволяет определить отношение энергий процесса деградации. В работе [2] было установлено, что ϕ_i приблизительно равно 1,3 эВ, а ϕ_{it} в различных литературных источниках лежит в диапазоне от 3,5 до 4 эВ. В работе [3] доказано, что из-за различия механизмов обрыва Si-H связей критическая энергия ϕ_{it} , которой электрон должен обладать для того, чтобы создать поверхностную ловушку, не является постоянной. На рисунке 1 (работа [1]) показаны зависимости для прогнозирования срока службы с различной энергией процесса деградации и, как следствие, с различным значением наклона ν . Первая прямая получена как зависимость $t_L I_d$ от I_{sub}/I_d . В ней нашли отражения процессы взаимодействия горячих электронов и дырок с границей раздела Si-SiO₂ и, как следствие, образование поверхностных и объемных ловушек. Вторая прямая ($t_L I_d$ от I_{sub}/W) отражает процесс обрыва связей Si-H и, как следствие, образование поверхностных ловушек.

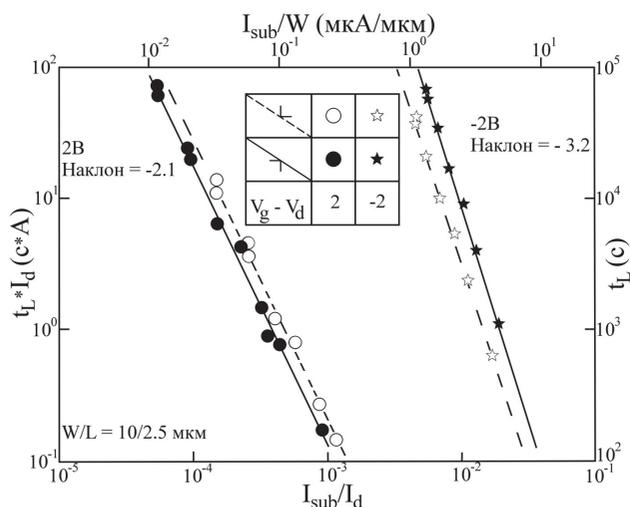


Рис. 1. Зависимости для прогнозирования срока службы при различной энергии процесса деградации

В работе [1] было показано, что генерация поверхностных ловушек (поверхностных состояний) является доминирующей причиной деградации МОПТ приборов вследствие воздействия горячих носителей, а ток подложки I_{sub} является наиболее простым и качественным индикатором процессов горячих носителей в МОПТ структурах. Таким образом, прогнозирование надежности методом аппроксимации степенной зависимости срока службы t_L от тока подложки I_{sub} , позиционируется во многих литературных источниках как наиболее простой и эффективный метод.

2. Постановка задачи

В данной статье были проанализированы графики зависимости срока службы t_L от тока подложки I_{sub} , взятые из

различных литературных источников [1, 4, 5, 6, 7], с целью определения конструктивно-технологических параметров, связанных с коэффициентом B в эмпирической формуле (1) и влияющие на результат прогнозирования срока службы. Таким образом, определение конструктивно-технологических параметров, связанных с коэффициентом B , а также определение их влияния на его значение, играет важную роль в прогнозировании надежности.

3. Описание экспериментов

В данной работе были проанализированы следующие эксперименты:

1) Эксперимент по определению срока службы для образцов с различными характеристиками.

В данном эксперименте были использованы образцы с характеристиками, показанными в таблице 1. Критерием потери работоспособности была величина относительного изменения тока стока $\Delta I_d/I_{d0} = 1\%$.

Таблица 1

Структура	T_{ox} (нм)	N_D^+ (см ⁻²)	N_D^- (см ⁻²)	L_{spacer} (мкм)	L_{eff} (мкм)
1 без LDD	40	$10^{16} As$	-	-	1,7
2 (LDD)	20	$6 \cdot 10^{15} As$	$10^{13} P$	0,15	1,0
3 (LDD)	17	$6 \cdot 10^{15} As$	$10^{13} P$	0,13	1,0

2) Эксперимент по определению зависимости срока службы от длины канала.

В данном эксперименте были использованы образцы с одинаковой структурой без LDD областей с толщиной окисла $T_{ox} = 8,5$ нм, но имеющие различную эффективную длину канала $L_{eff} = 1,5; 0,8; 0,5; 0,3$ мкм. Критерием потери работоспособности была величина относительного изменения тока стока $\Delta I_d/I_{d0} = 10\%$.

3) Эксперимент по определению влияния угла имплантации на срок службы.

В данном эксперименте были использованы образцы со структурными характеристиками, показанными в таблице 2.

Таблица 2

Технология	L_m , мкм	W , мкм	T_{ox} , нм	Угол имплантации LDD	Угол имплантации LATID	L_{spacer} , мкм
0,35 КМОП	0,4-1	40	8	7°	42°	0,12

4. Обсуждение результатов

На рисунке 2 представлен график зависимости срока службы t_L от тока подложки I_{sub} для трех вариантов образцов [4]. В таблице 3 представлены значения ко-

эффицентов B , полученные из зависимостей функций срока службы t_L от тока подложки I_{sub} , отраженных на рисунке 1.

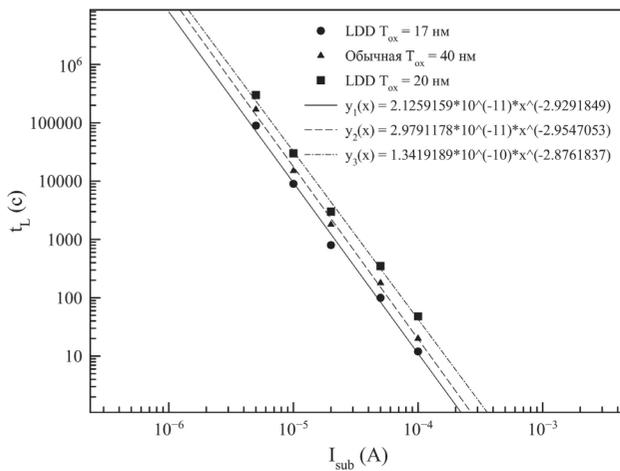


Рис. 2. График зависимости срока службы t_L от тока подложки I_{sub}

Таблица 3

B_1 LDD образцы, $T_{ox} = 17$ нм	$2,1259159 \cdot 10^{-11}$
B_2 Образцы без LDD, $T_{ox} = 40$ нм	$2,9791178 \cdot 10^{-11}$
B_3 LDD образцы, $T_{ox} = 20$ нм	$13,419189 \cdot 10^{-11}$

Из таблицы 3 видно, что наибольший разброс значений наблюдается у коэффициентов B , соответствующих вариантам образцов с LDD областями, но имеющих различную толщину подзатворного окисла ($\delta B_{3,3} = B_3 / B_1 = 6,3121$). Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициент B , а, следовательно, и результат прогнозирования надежности, зависит от толщины подзатворного окисла. Известно, что с уменьшением толщины подзатворного окисла растет вероятность инжекции горячих носителей и, как следствие, возрастает деградация приборных характеристик. Для снижения эффектов горячих носителей используют LDD области. В данном опыте хорошо видно, что использование LDD областей существенно увеличивает значение коэффициента B и, исходя из эмпирического уравнения (1), срок службы. Таким образом, коэффициент B в эмпирическом уравнении (1) имеет сильную зависимость от наличия низколегированных областей. Однако в виду наличия зависимости коэффициента B от толщины подзатворного окисла нельзя с точностью сказать, что использование LDD областей всегда будет приводить к увеличению значения коэффициента B и, как следствие, к увеличению срока службы. Сравнивая образцы, имеющие LDD области и различную толщину, видно, что увеличение толщины подзатворного окисла всего на 3 нм приводит к увеличению коэффициента B , а, следовательно, и

срока службы в 6 раз. Таким образом, в данном случае результат прогноза надежности для образцов, имеющих незначительное отличие в толщине подзатворного окисла, будет иметь большой разброс.

На следующем рисунке (рисунок 3) приводятся экспериментальные данные ускоренных испытаний по установлению времени сохранения работоспособности t_L в зависимости от I_{sub}/W_{eff} для образцов с различной длиной канала [5]. Далее в таблице 4 представлены значения коэффициентов B , полученные из зависимостей функций срока службы t_L от тока подложки I_{sub}/W_{eff} , отраженных на рисунке 3.

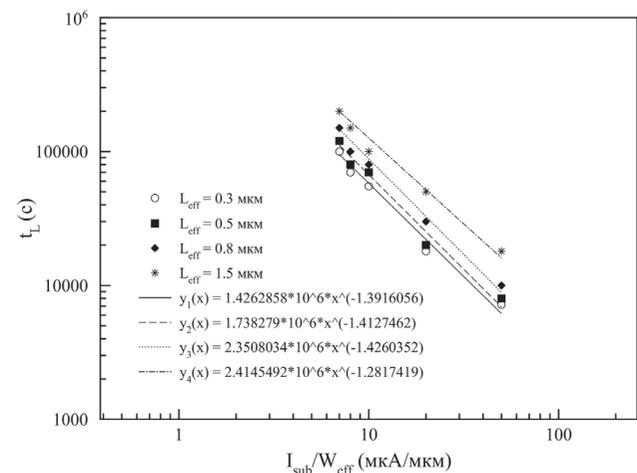


Рис. 3. Зависимость срока службы t_L от I_{sub}/W_{eff} при различной длине канала L_{eff}

Таблица 4

$B_1, L_{eff} = 0,3$ мкм	$1,4262858 \cdot 10^6$
$B_2, L_{eff} = 0,5$ мкм	$1,738279 \cdot 10^6$
$B_3, L_{eff} = 0,8$ мкм	$2,3508034 \cdot 10^6$
$B_4, L_{eff} = 1,5$ мкм	$2,4145492 \cdot 10^6$

Из таблицы 4 видно, что разброс коэффициента B находится в небольшом диапазоне. На рисунке 4 показано, как в данном опыте увеличение длины канала влияет на коэффициент B .

Из рисунка 4 видно, что до значения $L_{eff} = 0,8$ мкм все точки хорошо ложатся на экспоненциальную кривую описанную уравнением:

$$B = 1,0557927 \cdot \exp(0,9999067 \cdot L_{eff}),$$

следующая точка, при $L_{eff} = 1,5$ мкм практически лежит на одной горизонтальной прямой с точкой при $L_{eff} = 0,8$ мкм. Следовательно, можно предположить, что зависимость коэффициента B от длины канала носит экспоненциальный характер вплоть до значения длины канала $L_{eff} = 0,8$ мкм, а дальнейшее увеличение длины канала практически не влияет на изменение коэффициента B . Следует отметить, что такая экспоненциальная зависимость коэффициента B от длины канала наблюдается конкретно в данном опыте, тогда как в других похожих

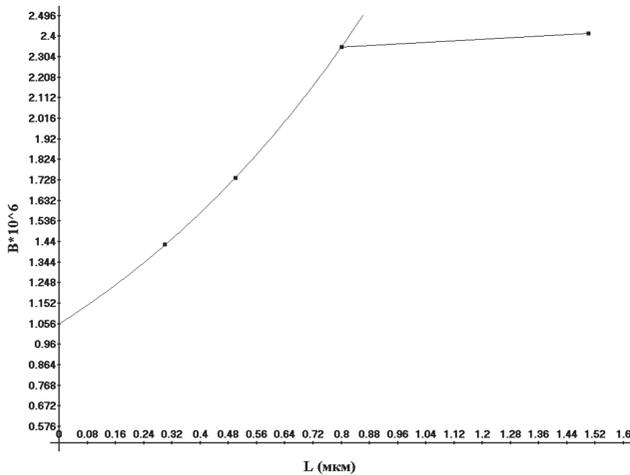


Рис. 4. Зависимость коэффициента B от длины канала L_{eff}

опытах данная зависимость может не прослеживаться. В работе [6] показано, что при изменении критерия потери работоспособности зависимость коэффициента B от длины канала исчезает (рисунок 5) и все экспериментальные данные ложатся на одну прямую.

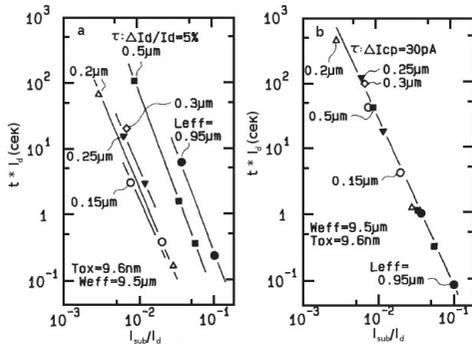
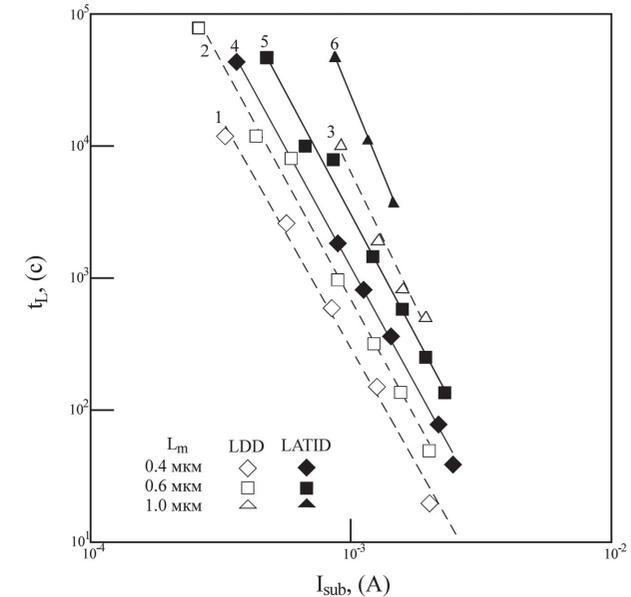


Рис. 5. Зависимость приведенного срока службы $t \cdot I_d$ от приведенного тока подложки I_{sub}/I_d а) критерий потери работоспособности $\Delta I_d/I_{d0} = 5\%$; б) критерий потери работоспособности $\Delta I_{cp} = 30$ Па

Следовательно, можно сделать вывод, что коэффициент B имеет зависимость от длины канала, но только при выборе определенного критерия потери работоспособности, что в свою очередь дает различные результаты аппроксимации и, следовательно, различия в прогнозировании срока службы и надежности. Также следует отметить, что в данном опыте, изменение длины канала влияет на значение коэффициента B не так значительно, как толщина подзатворного окисла в предыдущем опыте. Из этого следует, что вклад в значение коэффициента B от длины канала носит меньший характер, чем вклад от толщины подзатворного окисла.

На рисунке 6, представлены графики зависимости срока службы от тока подложки для двух типов образцов (LDD и LATID) с различными длинами канала. Как видно из таблицы 2, образцы, использованные в этом опыте, отличаются лишь углом имплантации при

создании слаболегированных областей стока (LDD и LATID). В данном опыте (рисунок 6) были взяты 6 образцов с различной длиной канала (три для LDD области с углом имплантации 7° и три для LATID с углом имплантации 42°) [7].



1) $y = 1.0436555 \cdot 10^{(-8)} \cdot x^{(-3.4813813)}$ 2) $y = 1.13763 \cdot 10^{(-8)} \cdot x^{(-3.6000825)}$
 3) $y = 5.3943929 \cdot 10^{(-8)} \cdot x^{(-3.6915151)}$ 4) $y = 1.7954248 \cdot 10^{(-8)} \cdot x^{(-3.6063543)}$
 5) $y = 1.1657934 \cdot 10^{(-8)} \cdot x^{(-3.7994218)}$ 6) $y = 2.9085351 \cdot 10^{(-10)} \cdot x^{(-4.6309805)}$

Рис. 6. Зависимость срока службы t_L от тока подложки I_{sub} для технологий LDD и LATID с различной длиной канала L_m 0,4 – 1 мкм

В таблице 5 представлены значения коэффициентов B , полученные из зависимостей функций срока службы t_L от тока подложки I_{sub} , отраженных на рисунке 6.

Таблица 5

$B_1, L_m = 0,4$ мкм (LDD)	$1,0436555 \cdot 10^{-8}$
$B_2, L_m = 0,6$ мкм (LDD)	$1,13763 \cdot 10^{-8}$
$B_3, L_m = 1$ мкм (LDD)	$5,3943929 \cdot 10^{-8}$
$B_4, L_m = 0,4$ мкм (LATID)	$1,7954248 \cdot 10^{-8}$
$B_5, L_m = 0,6$ мкм (LATID)	$1,1657934 \cdot 10^{-8}$

Из рисунка видно, что практически все прямые имеют одинаковый наклон, за исключением образца LATID с длиной канала $L_m = 1$ мкм, поэтому коэффициент B , относящийся к данному образцу, нельзя сравнивать с остальными. Из таблицы видно, что наибольшее значение коэффициента B имеет образец с LDD областью и длиной канала $L_m = 1$ мкм, а разброс коэффициента B , в зависимости от длины канала находится в большем, в отличие от опыта, представленного на рисунке 4 (который проводился на образцах без LDD областей), диапазоне. Сравнивая значение коэффициента B , соответствующего LDD области с длиной канала $L_m = 1$ мкм, и значение

коэффициента B , соответствующего LDD области с длиной канала $L_m = 0,4$ мкм, видно, что оно увеличивается в 5 раз при увеличении длины канала на 0,4 мкм, что говорит о сильном влиянии длины канала на результат прогнозирования срока службы и надежности. Таким образом, это еще раз подтверждает предположение, что на величину значения коэффициента B , а, следовательно, и на срок службы, влияет как увеличение длины канала, так и наличие LDD и LATID областей. Из рисунка видно, что прямые, соответствующие LATID структурам, лежат выше прямых, соответствующих LDD структурам; это означает, что на значение коэффициента B влияет наличие слабелегированных областей (LDD и LATID) и угол имплантации.

5. Заключение

Существенное влияние на значение коэффициента B оказывает толщина подзатворного окисла и в некоторых случаях оно превалирует над влиянием структуры (наличию LDD областей). Также на коэффициент B оказывает влияние длина канала. Наиболее значительное влияние на коэффициент B имеет тип структуры, а именно такой конструктивно-технологический параметр, как наличие LDD или LATID областей и угол имплантации.

Прогнозирование надежности с использованием аппроксимации степенной зависимости срока службы t_L от тока подложки I_{sub} может иметь большую погрешность из-за сильного влияния множества конструктивно-технологических параметров, описанных выше, а также выбора критерия потери работоспособности. Такой подход к прогнозированию надежности требует проведения испытаний для всех образцов, имеющих даже незначительные отличия (например, небольшая разница в толщине подзатворного окисла или угле имплантации).

Данный метод нуждается в доработке посредством более точного определения влияния конструктивно-технологических параметров на эмпирический коэффициент B в степенной зависимости срока службы t_L от тока подложки I_{sub} .

Литература

1. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. в 2-х частях. Часть 2. – Москва: Техносфера, 2004. – 536 с.:ил.
2. **Chenming Hu**, Senior member, IEEE, **Simon C. Tam**, member, IEEE, **Fu-Chien Hsu**, member, IEEE, **Ping-Keung Ko**, member, IEEE, **Tung-Yi Chan**, **Anid Kyle**, **W. Terril**. Hot-Electron-Induced IMOSFET Degradation — Model, Monitor, and Improvement. IEEE Journal of Solid-state circuits, vol. SC-20, No. 1, February 1985.
3. **Tibor Grassler**. Hot Carrier Degradation in Semiconductor Devices, Springer International Publishing Switzerland 2015.
4. **Weber W., Werner C. and Schwerin A.** Lifetime and substrate currents in static and dynamic hot carrier degradation. IEDM 86, p. 15.4, IEEE 1986.
5. **James E. Chung, Min-Chie Jeng, James E. Moon, Ping-Keung Ko, Chenming Hu.** Low-Voltage Hot-Electron Currents and Degradation in Deep-Submicrometer MOSFET's. IEEE Transactions on electron devices, vol. 37. № 7, p. 1651, July 1990.
6. **Hazama H., Iwase M., Takagi S.** Hot carrier reliability in deep sub-micrometer MOSFET's. IEDM 90, p. 24.5.1, IEEE 1990.
7. **Rafi J.M., Campabadal F.** Hot-carrier degradation in deep-submicrometer nMOSFET's: lightly doped drain vs. large angle tilt implanted drain. Solid-State Electronics 45 (2001), p. 1391-1401.