

Kapitel 3

Field Emitter Arrays

Nach der Betrachtung der grundsätzlichen Rahmenbedingungen und Eigenschaften von Feldemission gibt dieses Kapitel einen Überblick über die historische Entwicklung und die unterschiedlichen Ausprägungen von Field Emitter Arrays in der Praxis. Dazu werden Anordnungen mit und ohne Steuerelektrode erläutert, sowie die zwei bedeutendsten Fertigungstechniken vorgestellt, indem metallische Spindt-type-Emitter und Feldemissionsspitzen aus Silizium näher betrachtet werden. Auf Feldemission aus Isolatoren und Carbon Nanotubes wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, sondern auf einschlägige Literatur verwiesen, exemplarisch auf [Lee01, Che07, Sta99].

3.1 Ungated Field Emitter Arrays

Ungated Field Emitter, die auch als Diodenkonfiguration bezeichnet werden, bestehen lediglich aus Feldemissionsspitzen und einer darüber angeordneten Anode. Ihr Haupteinsatzgebiet findet sich in Anwendungen, in denen eine hohe Dichte [Hsu96] an Feldemittern benötigt wird, da sie eine hohe Packungsdichte für sich reklamieren können und keine Notwendigkeit für individuelle Extraktoren besteht.

Ein aktuelles Forschungsfeld sind hierbei Lichtquellen, bei denen Ströme in der Größenordnung von einigen Mikroampere aus einem Array erzielt werden können [Cha03]. Allerdings sind für Anwendungen, in denen Ungated Field Emitter zum Einsatz kommen, aufgrund der großen Abstände hohe Spannungen in der Größenordnung von einigen kV notwendig, um die in 2.3.2 erläuterten $10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ makroskopischer Feldstärke zu erreichen. Dadurch erhöht sich die Gefahr von elektrischen Entladungen. Auch die Lebensdauer der Emitter kann unter den parasitären Effekten leiden, die durch die hohen Spannungen erzeugt werden.

Daneben eignet sich die Anordnung aus Feldemitter und Anode gut zur Charakterisierung der Emissionseigenschaften unterschiedlicher Feldemissionsspitzen, da mit einem einheitlichen Aufbau, beispielsweise einem vorgespannten Leuchtschirm und räumlicher Trennung zur Probe [Gun02],

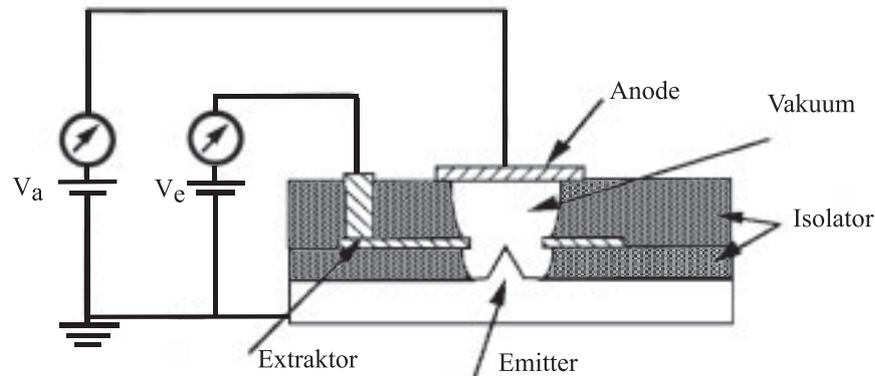


Abbildung 3.1: Schema eines Gated Field Emitters mit integrierter Anode nach [Sun92]

die Schwankungsfaktoren minimiert werden können. Durch die räumliche Trennung werden Kriechströme minimiert.

Um den Vorteil der direkt gegenüber angeordneten Lage von Anode und Emitter beizubehalten und trotzdem die Extraktionsspannungen zu minimieren, bietet sich die Integration von Anoden auf das Substrat der Feldemitter an. Damit können die Abstände zwischen Emitter und Anode auf wenige hundert Nanometer bis wenige Mikrometer reduziert werden. Hierfür ist eine Isolation zwischen Anode und Emitter direkt auf dem Substrat, z.B. in Form einer Opferschichttechnologie, notwendig. Allerdings sind hierbei andere Schwierigkeiten zu erwarten, auf die in Kap. 6.5.1 näher eingegangen wird.

3.2 Gated Field Emitter Arrays

Gated Field Emitter verfügen gegenüber der Diodenkonfiguration über einen Extraktionsring, der zwischen Emitter und Anode (bzw. Zielfläche) eingebracht ist. Bei Abständen von typischerweise weniger als einem Mikrometer ist bereits bei Spannungen in der Größenordnung von 100 V eine Extraktion von Elektronen möglich, die nach der Extraktion von der entfernten Anode in diese Richtung beschleunigt werden können [Bus92].

Es existieren in der Literatur Abwandlungen, bei denen neben dem Extraktor auch die Anode direkt in den Chip integriert ist, wie beispielhaft in Abb. 3.1 dargestellt. Dabei kann zwischen konventioneller vertikaler [Sun92, Und98] und lateraler Bauart [Par97] unterschieden werden, wobei im ersteren Falle die Nutzung freitragender Strukturen als Anode in Opferschichttechnologie angezeigt erscheint, um einen direkten Überbau trotz eines Vakuum-Spalts zu ermöglichen.

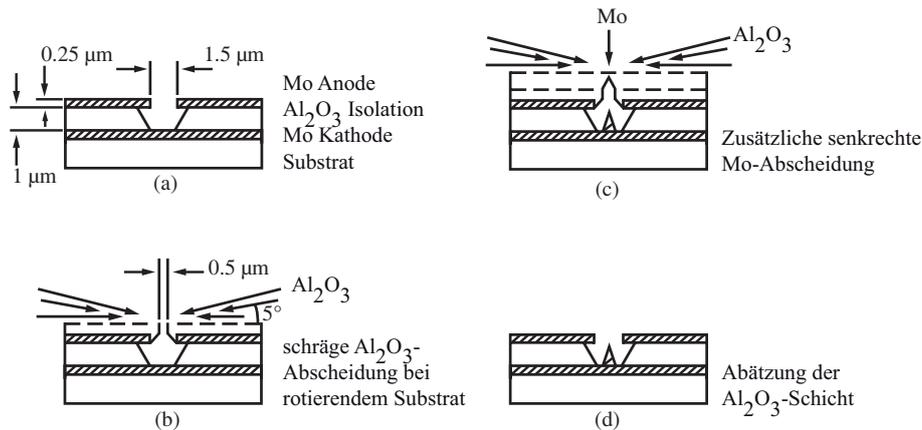


Abbildung 3.2: Basisprozess für Spindt-type Emitter nach [Spi68]

3.3 Spindt-type-Emitter

Der Name der Spindt-type-Emitter leitet sich vom Entwickler der entsprechenden Technologie ab. 1968 veröffentlichte C.A. Spindt erstmals mikrostrukturierte Field Emitter Arrays [Spi68]. Es folgten weitere Veröffentlichungen mit weiterentwickelten Technologien, exemplarisch seien [Spi76, Spi91, Spi94, Spi96, Spi98, Agu00] genannt. Parallel zur Weiterentwicklung durch Spindt et al. wurde die Idee auch an anderer Stelle aufgegriffen, modifiziert oder erweitert und zur Veröffentlichung gebracht. Aus den zahllosen Veröffentlichungen sollen [Vee94, Got00, Din04, Des05] als Beispiele genannt werden. Für eine Übersicht sei [Ito06] empfohlen.

Der Grundprozess für die Herstellung von Spindt-type Emittern ist in Abb. 3.2 dargestellt. Auf ein Glassubstrat, einen Silizium-Wafer oder auch eine Schicht hochdotiertes Polysilizium [Kim97] wird eine leitende Schicht aufgebracht bzw. durch Dotierung eingebracht. Eine Isolatorschicht sowie eine Metallisierungsschicht, beispielsweise aus Molybdän, bilden die Extraktionsstruktur. Für die Verwendung von Molybdän spricht hier die Selektivität gegenüber Materialien bei Ätzungen für die weiteren Prozessschritte sowie die Eignung als Material für Feldemitter [Spi76].

Mithilfe eines Lithographieschrittes und anschließender Metallätze werden kreisrunde Öffnungen in die Metallisierung eingebracht, gefolgt von einer Ätzung des Isolators durch die Öffnungen in der Metallisierung bis hinab zur unteren Metallebene. Dadurch entsteht ein Hohlraum zwischen den beiden leitenden Flächen. Durch die Unterätzung ist der Hohlraum am oberen Ende größer als die Öffnung in der Metallisierung (Abb. 3.2a). Es folgt die Abscheidung einer Opferschicht, die im flachem Winkel unter Drehung des Substrats typischerweise im Elektronenstrahlverdampfer aufgebracht wird. Als Material kommt hier beispielsweise Aluminiumoxid infrage. Die Folge ist eine Reduzierung des Öffnungsdurchmessers (vgl. Abb. 3.2b).

Bei immer weiter schrumpfender Öffnung folgt in senkrechter Ausrichtung die Abscheidung des Konusmaterials, traditionell aus Molybdän, hergestellt im Elektronenstrahlverdampfer (Abb. 3.2c). Durch Einsatz von Sputtertechniken [Vee95], aber auch durch Verdampfen [Ito95a], sind allerdings auch andere Materialien mit niedrigerer Austrittsarbeit oder anderen abweichenden Eigenschaften möglich, beispielhaft seien hier Niob, Hafnium oder Nickel genannt. Dabei sind Krümmungsradien bis hinab zu 1 nm in der Literatur gezeigt worden [Goo94]. Aufgrund des selbstorganisierenden Wachstums bietet sich auch Polysilizium für eine Abscheidung von Emittlern an. Durch die notwendigen hohen Temperaturen und/oder anschließend notwendigen Siliziumätzungen gestaltet sich die Integration, speziell in aktive Bauelemente, allerdings schwieriger als mit den genannten Metallen.

Sobald die Öffnung durch den flachen Einfall der Opferschicht komplett verschlossen ist, ist in der Aushöhlung eine scharfe Spitze entstanden. Durch eine selektive Ätze der Opferschicht wird die Emitter-Extraktorstruktur wieder freigelegt (Abb. 3.2d). Bei Bedarf kann der Opferschicht-Abscheidungsprozess wiederholt werden, was zu einem höheren Emitter mit höherem Aspektverhältnis führt. Dies hat, wie in Kap. 2.3.1 dargestellt, zumeist einen höheren Extraktionsstrom bei gleicher makroskopischer Feldstärke zur Folge.

Typische Abmessungen für die Extraktoröffnung liegen bei 0.5 bis 2 Mikrometern in optischer Lithographie und hängen von der Auflösung der Belichterapparatur ab. Mit feineren Lithographietechniken wie Elektronenstrahlithographie, Focused Ion Beam (FIB) Lithographie oder Interferenzlithographie konnten darüber hinaus noch kleinere Öffnungen bis hinab zu 150 nm gezeigt werden [Boz94].

Vorteilhaft an der Herstellung von Feldemissionsspitzen nach der Idee von Spindt ist die Tatsache, dass durch selbstjustierende Abscheidung des Emitters, nach der Herstellung des Extraktors, eine ideale Justage der beiden Komponenten zueinander sichergestellt ist. Damit wird eine hohe Gleichmäßigkeit der Strukturen geschaffen. Obwohl die Herstellung kostspieliger verglichen mit anderen Technologien ist, sind Spindt-type Emitter derzeit das Mittel der Wahl für Feldemissionsdisplays [Ito06].

Abgesehen von der Notwendigkeit der gleichzeitigen Abscheidung in senkrechter und schräger Richtung ist der Prozess einfach zu realisieren. Er stellt keine übermäßigen Ansprüche an Lithographieprozesse, da Extraktoröffnungen nicht kleiner als ein Mikrometer sein müssen. Das Wachstum der Emitter erfolgt durch den Abscheideprozess selbstlimitierend.

3.4 Geätzte Emitter

Im Gegensatz zum Prozessablauf nach Spindt erfolgt bei in Ätztechnik hergestellten Feldemissionsspitzen die Ausformung des Extraktors erst nach der Herstellung des Konus, sofern Gated Field Emitter Arrays erstellt werden sollen. Bei Verzicht auf diesen abschließenden Schritt ermöglicht diese Art der

Herstellung sonst Ungated Field Emitter Arrays.

Grundsätzlich eignet sich jedes Material zur Herstellung von geätzten Feldemittern, so lange ein Ätzprozess dafür existiert, um konusförmige Gebilde zu erzeugen. Der Fokus dieser Ausführungen soll auf Ätztechniken für einkristallines Silizium liegen, da es zum einen das am häufigsten eingesetzte Material und zum anderen Ausgangspunkt der CMOS-Technologie ist, die die Grundlage der vorliegenden Arbeit bildet.

Andere Materialien, aus denen in der Vergangenheit erfolgreich Feldemissionsspitzen geätzt wurden, sind Polysilizium [Bos96b, Uh97], amorphes Silizium [Sil98, Li08] und poröses Silizium [Bos96a, Jes96], aber auch Metalle sind vorstellbar.

Insbesondere polykristallines Silizium hat seine Vorteile darin, dass es auf nahezu jeder Oberfläche, also beispielsweise auch auf Isolatoren wie Glassubstraten, abgeschieden werden kann, was potentielle Kostenvorteile für die Industrie erzeugt, so es denn für die Endanwendung applikabel ist. In diesem Zusammenhang konnten auch Möglichkeiten zur Schärfung des Spitzenradius gezeigt werden, die bei Polysilizium durch Silizidierung ermöglicht werden [Lee97].

Im grundsätzlichen Prozessverlauf wird auf das einkristalline Substrat in (100)-Orientierung eine Maskierungsschicht aufgebracht. Üblicherweise ist dies entweder thermisch gewachsenes Siliziumdioxid oder abgeschiedenes Siliziumnitrid. Grundsätzlich ist aber jedes Material denkbar, gegenüber dem sich Silizium mit einer hohen Selektivität ätzen lässt. In einem Lithographieschritt mit anschließender Ätze, beispielsweise Flussäure für Siliziumdioxid, werden Inseln - in englischer Literatur zumeist als „caps“ bezeichnet - hergestellt. Diese Inseln dienen als Maskierung beim anschließenden Ätzprozess zur Herausbildung der Emitter.

Für diesen Ätzprozess kommen verschiedene nass- und trockenchemische, anisotrope und isotrope Ätztechniken infrage. Als anisotrope Ätzen bieten sich hierbei in erster Linie kristallorientierungsabhängige nasschemische Lösungen an. Typisch sind hierfür Kalilauge [Zho98], Ethylendiamin [Tem95], Hydrazin [Koh01] oder Tetramethylammoniumhydroxid [Tan05]. Des Weiteren können anisotrope Ätzprofile durch physikalisches und physikalisch-chemisches Trockenätzen mit verschiedenen Gasen [Men05] erzeugt werden. Hierauf wird in Kap. 6 näher eingegangen, eine schematische Darstellung des Prozessablaufs zeigt Abb. 6.9.

Isotrope Ätzprofile zur Herstellung von Feldemissionsspitzen in nasschemischer Technik wurden in der Literatur mit einer wässrigen Mischung von Salpetersäure, Flussäure, Essigsäure und deionisiertem Wasser gezeigt [Tem98]. Zumeist kommen für isotrope Ätzprofile allerdings trockenchemische Techniken zum Einsatz, die in Form des reaktiven Ionenätzens (RIE), beispielsweise mithilfe der Ätzgase Schwefelhexafluorid und Sauerstoff, durchgeführt werden [Wel97]. Ein entsprechender schematischer Ablauf ist in Abb. 6.9 dargestellt.

Zur Schärfung des Spitzenprofils und zum Ausgleich etwaiger Unterschiede in der Größe der maskierenden Inseln folgt auf den Ätzschritt üblicherweise eine thermische Oxidation, bei der die Emitter seitlich aufoxidiert werden, bis unterhalb der Kappe eine Spitze entsteht, die idealerweise nur einen Krümmungsradius von wenigen Atomen hat. Bei der Erstellung von Ungated Field Emittern ist der Herstellungsprozess nach Entfernung der Oxidschicht mitsamt des „caps“ abgeschlossen.

Für Gated Field Emitter ist noch eine weitere Metallisierung notwendig, um den Extraktor herzustellen. Hierfür wird die abschattende Wirkung der Oxid- oder Nitridkappe genutzt, um die Metallisierung selbstjustierend um den Emitter anzuordnen [Mat00]. Bei hohen Aspektverhältnissen, d.h. sehr tiefen Ätzungen und nahezu senkrechten Flanken zwischen thermischem Oxid und Metall, kann noch eine zusätzliche Isolatorschicht eingebracht werden, um die Metallisierung auf Höhe der Emitterspitze zu bringen [Tem98]. Diese kann alternativ auch thermisch gewachsen werden [Uh95]. Abschließend sorgt ein Ätzschritt in gepufferter Flusssäure für die Entfernung der Kappe sowie des thermischen Oxids, das die Emitterspitze bedeckt.

Typische Größenordnungen für auf diese Weise gefertigte Strukturen auf Basis von einkristallinem Silizium sind einige Mikrometer in der Höhe sowie Krümmungsradien an der Spitze des Emitters von wenigen Nanometern.

Von diesem Grundkonzept abweichend sind verschiedene Variationen bekannt, in denen Spin-on-Gläser [Tru93] und Planarisierungsschritte wie schichtweises Aufschleudern und Abätzen von Spin-on-Glas [Lee89] oder chemisch-mechanisches Polieren (CMP) [Dvo01] verwendet werden. Ebenso möglich sind Emitter mit größerer Höhe durch zwei aufeinanderfolgende Oxidationen [Tak97].

Einen Mittelweg zwischen Spindt-type-Emittern und den vorstehend genannten geätzten Emittern stellen Spitzen mit Metallüberzug dar. Speziell im Fall von Ungated Emittern können durch einen Metallüberzug die Emissionseigenschaften angepasst werden, da beispielsweise Lageroxide vermieden werden oder Materialien mit niedrigeren Austrittsarbeiten zum Einsatz kommen. Die Menge infrage kommender Materialien ist dabei groß. Es wurden Arbeiten mit Cäsium, Gold, Kalium, Lithium, Nickel und Platin gezeigt [Tal95, Tem99]. Ebenso möglich sind Überzüge aus Metallnitriden und -carbiden [Mac94, Sha94, Xie96].

3.5 Kohlenstoffnanoröhren und andere Emitter

Eine aktuell in der Forschung in zunehmendem Maße diskutierte Umsetzung von Feldemissionsspitzen ist in Form von Kohlenstoff-Strukturen zu sehen. Hierbei sind sowohl Diamant [Giv94], amorphe Kohlenstoffstrukturen [Mye94] als auch Kohlenstoffnanoröhren (CNTs) [Sta99] denkbare Alternativen. Diese können, wie im Vorkapitel erwähnt, als Überzug, aber auch als Grundlage zur Herstellung von Emittern verwendet werden.

Da sich die vorliegende Arbeit mit CMOS-kompatiblen Techniken beschäftigt, wird auf Kohlenstoffstrukturen an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Eine ausführliche Betrachtung der Thematik bietet [Goh02].

Eine weitere Aufstellung von Detaillösungen zur Herstellung von Feldemittern, die über das für diese Arbeit relevante Maß hinausgehen, ist in [Tem99] zu finden.