



Manufacturing Bonded SOI wafers

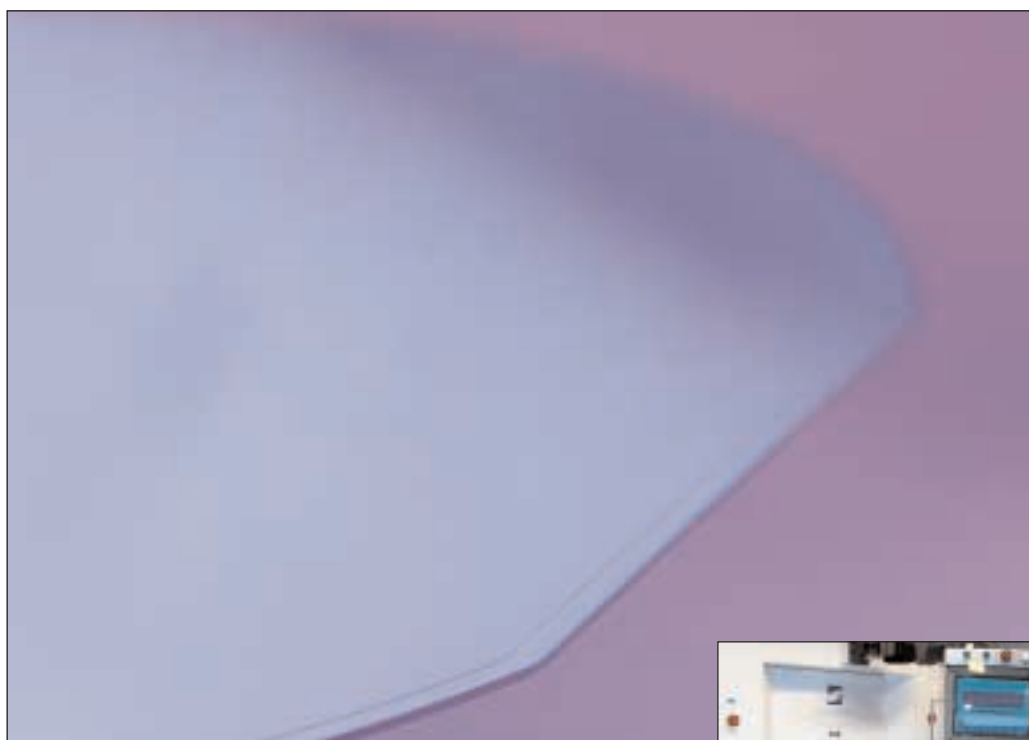
A brief introduction to the manufacturing process of BSOI (Bonded Silicon On Insulator) as well as some applications is given in this article. Also fundamentals of deep reactive etching (DRIE), an essential process step in making advanced microstructures with BSOI wafers, are covered.

Okmetic Oyj has been manufacturing and supplying to worldwide customer base BSOI wafers for MEMS and MOEMS applications (suitable for micromechanical sensor and optical industries) in a pilot plant and is now finishing a dedicated full scale production line capable of making up to 200 mm wafers sizes with production starting early 2002.

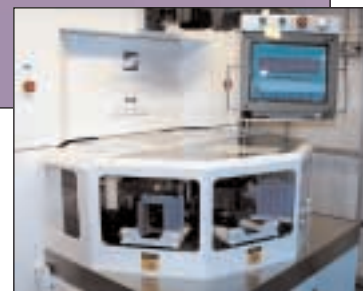
Okmetic Oyj has been perfecting the process together with VTT Electronics laboratory with support from Tekes ETX program. Markku Tilli (markku.tilli@okmetic.com) is a Senior Vice President at Okmetic Oy.

Mikromekaanisia komponentteja voidaan valmistaa piistä kahdella tavalla, joko pintamikromekaanikalla piikiekon pinnalle tai niin sanotun bulk-mikromekaanikan menetelmin tunkeutuen piikiekon sisään. Edellisellä tavalla yhdistetään tavallisesti sähköiset toiminnot (komponenttia ohjaava mikropiiri) anturirakenteeseen samalle piisirulle. Tällä tavoin valmistetaan muun muassa halpoja ilmatyynyyn laukaisua kontrolloivia kiihtyvyyssantureita (vaativat laukaisijat tehdään bulk-mikromekaanikalla). Tarkkuusanturit valmistetaan tavallisimmin jälkimmäisellä tekniikalla, jossa esimerkiksi anturin rakenne syövytetään piikiek-

BSOI-kiekkoo avaa uusia mahdollisuuksia Monipuolisempaa mikromekaniikkaa



Mikromekaanisten komponenttien käyttö yleistyy jatkuvasti. Uusien komponenttien valmistuksessa auttavat sekä etsauksen uudet menetelmät että SOI-kiekkojen valmistusmenetelmien kehittyminen.



BSOI-kiekkojen tarkkuushiomakone.

Precision grinder for BSOI wafers.

koon; näin tehdään esimerkiksi suomalaisen VTI-Hamlinin anturit.

Mikromekaanikassa käytetään yleisemmin 100-piikiekkooja, kiekkoja, joiden kuutiollisen hilan (100)-atomitaso on kiekon pinnan suuntainen. Syövytyksessä käytetään valikoivia, niin sanottuja anisotrooppisia syövytteitä, jotka syövyttävät eri atomitasoja eri nopeuksilla. Tiettyillä syövytteillä (kaliumhydroksidiliuos on eräs vaihtoehto) piin (111)-atomitasot syöpyvät erittäin hitaasti, samoin piidioksidi syöpyy hitaasti. Käyttäen tätä ilmiötä anturinvalmistaja voi valmistaa (100) piikiekon sisään esimerkiksi ohuita, tarkoin määritellyn kokoisia kal-

voja kuvioitua oksidimaskia käyttäen. Kalvoilla voidaan mitata vaikka painetta.

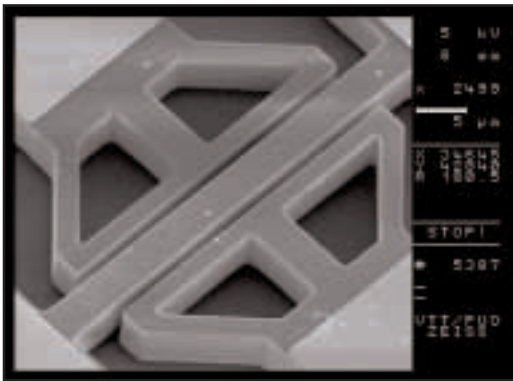
Hiukan monimutkaisemmin, mutta samalla periaatteella piihin voidaan syövyttää ohuiden palkkien varassa liikkuvia piimassoja; näistä voidaan tehdä esimerkiksi kiihtyvyyssanturi, asennon tunteva anturi tai jopa useampaan suuntaan liikettä havaitseva inertia-anturi. Anisotrooppisen syövytyksen ongelma tulee piin kiderakenteesta; kuutiollisen hilan (100) ja (111)-tasojen välinen kulma on $54,7^\circ$.

Jos paineanturin kalvon leveys on L, anturin leveydeksi tulee vähintään $1.4 \cdot D + L$, missä D on kiekon paksuus. Piisirun

koko on siis aina suurempi kuin anturin aktiivisen alueen koko, ja sitä suurempi mitä paksumpi kiekko on. Jos sirulle jäävä hukka-alue voitaisiin eliminoida, saataisiin samalle piikiekolle mahtumaan useampia komponentteja ja anturin kustannukset laskisivat.

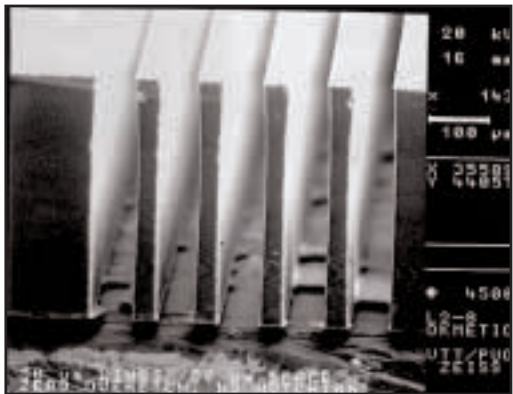
Pystysuora etsaus ratkaisee ongelman

Reaktiivinen ionisyövytys (RIE) on ollut jo kauan mikropiirien valmistuksessa esimerkiksi eristävien hautojen (trench) valmistuksessa. Eräs



Kuvassa on noin 14 megahertsin resonaattori, joka on tehty mikromekaniikka-BSOI-kiekon rakennekerrokseen piin syväetsauksella. Tavoitteena on ollut tehdä ohjaus-elektrodien ja resonaattorisillan välisistä raoista mahdollisimman kapeat.

The picture illustrates a resonator operating at approximately 14 megahertz, that has been achieved through deep etching of silicon on the structural layer of micro mechanical BSOI wafer. The goal has been to achieve the narrowest possible gaps between control electrodes and the resonator bridge.



DRIE-tekniikalla syövytettyjä uria anturikiekon läpi. Menetelmällä kyetään syövyttämään pystysuoria seinämiä

Etched canals through a sensor wafer by DRIE technology. The method allows etching of straight vertical surfaces.

Kuva Jyrki Kiihamäki, VTT Elektronikka

anturin valmistaja keksi jokin aika sitten menetelmän, jolla ionisyövytys saadaan sopivilla kaasulla hyvin anisotrooppiseksi ja samalla syövytysnopeutta kasvatettiin useaan mikrometriin minuutissa; menetelmän englanninkielinen lyhenne on DRIE (Deep Reactive Ion Etching).

Tällä prosessilla voidaan syövyttää pystysuoria onkaloita vaikka läpi ohuen kiekon noin tunnissa. Parhaimmillaan onkaloiden leveys on vain joitakin mikrometrejä. DRIE-tekniikalla valmistetuissa antureissa ei piisirun koko kasva (111)-tasojen hukka-alueella. Toinen anturinvalmistuksessa käytetyn DRIE-syövytyksen piirre on se, että piidioksidi ei syövy juuri ollenkaan.

Piidioksidin syöpymättömyys ja pystysuorat seinämät tekevät tekniikan ihanteelliseksi kun SOI-kiekoille valmistetaan anturirakenteita. Kalliille kiekolle voidaan valmistaa pieniä piisiruja ilman hukka-alueita, ja SOI-kiekolle valmistettu rakenne, komponentti voi olla hyvin monimutkainen toisin kuin märkäsyövytyksellä valmistettuna.

SOI-kiekoja moneen lähtöön

SOI-kiekkoa (Silicon On Insulator-piikiekk) käytetään niin uuden sukupolven mikropiirien ja tehokomponenttien kuin antureidenkin valmistuksessa. Sama SOI-kiekkio ei kuitenkaan

käy kaikkiin tarkoituksiin ja tämän vuoksi SOI-kiekoja on eri tyyppisiä. Mikropiirien valmistukseen käytettävässä kiekossa on alustakiekon päällä oleva oksidi ohut ja SOI-kalvokin on yleensä hyvin ohut. Anturit ja optiset komponentit taas vaativat yleensä paksun oksidin ja paksun piikerroksen.

Markkinoilla onkin monenlaisia SOI-kiekoja, puhutaan esimerkiksi SIMOX-, SmartCut(r)-, Eltran(r)- tai BSOI-kiekoista. Ensimmäisillä kolmella tekniikalla valmistetaan ohuita piikerroksia ja tässä esityksessä keskitytään vain viimeiseen, BSOI-kiekkoon, jossa SOI-kalvon paksuus voi olla muutamasta mikrometrinä muutamaan sataan mikrometriin ja haudattu oksidi voi olla useita mikrometrejä paksu.

Okmetic Oyj:ssä on tutkittu ja kehitetty BSOI-prosessia yhteistyössä VTT Mikroelektronikan kanssa jo viisi vuotta ja tämän vuoden alkupuolella yhtiö ilmoitti aloittavansa kiekkojen volyymituotannon vuoden 2002 alkupuoliskolla. Siihen asti SOI-kiekot valmistuvat koetustaasta, jossa niitä on valmistettu yli vuoden ajan.

Alueen kasvunäkymät ovat hyvät; siinä missä viime vuosikymmenet olemme saaneet kokea mikropiirien vallankumousta, olemme eräiden visionäärien mukaan anturivallankumouksen edessä, piille rakennetut anturit tunkeutuvat entistä enemmän

jokapäiväiseen elämäämme. Esimerkiksi Suunnan rannetietokoneessa ilmanpaine mitataan bulk-mikromekaniikalla valmistetulla paineanturilla.

BSOI-kiekkojen valmistus

Kiekon nimi on lyhenne sanoista Bonded SOI, eli kuten nimikin jo ilmaisee, BSOI-kiekot valmistetaan liittämällä diffuusioliitoksella kaksi kiekkoa yhteen. BSOI-kiekkojen lähtömaterialina käytetään anturisovelutuksiin kehitettyä piikidettä, jonka sisäiset ominaisuudet on viritetty vuosien kehitystyön tuloksena anturinvalmistukseen sopivaksi. Toinen tai molemmat kiekot oksidoidaan ennen yhteen liittämistä.

Liitos on tehtävä erittäin puhtaissa olosuhteissa ja kiekkojen pinnalla ei saa olla pieniäkään hiukkasia tai muuta epäpuhtautta, sillä muussa tapauksessa liitos ei tule virheettömäksi, vaan syntyy ns. voideja, joiden kohdalla sidos rajapintojen välillä on heikko. Kun liitettävät pinnat ovat atomäärin sileitä ja virheettömiä, syntyy jo huoneenlämpötilassa varsin luja liitos. Liitoksen lujittamiseksi ideaaliseksi kiekot kuitenkin lämpökäsitellään yli tuhannen asteen lämpötilassa.

VTT:n tutkimusohjelmissa on kehitetty pintojen käsittelyprosesseja, joilla lujittuminen voidaan tehdä jo muutaman sadan asteen lämpötilassa. Tällaiset matalalämpötilaliitosprosessit ovat tarpeen, jos esimerkiksi liitetään yhteen kiekkoja, joihin on liitosrajapintaan kuvioitu komponentin osia, esimerkiksi johdotuksia tai halutaan esimerkiksi minimoida kerrosten välisiä diffuusiota. Lämpökäsittelyn jälkeen voitit on varsin helppo tutkia kartoittavalla akustisella mikroskoopilla, jolla kyetään näkemään jo kymmenenkin mikrometrin virheet.

Aktiivikerroksen, SOI-kerroksen, ohentaminen on vaativa vaihe. Paksu piikerros on hiottava pois niin että jäljelle jäävän kerroksen paksuusvaihtelu on

mahdollisimman pieni, alle puoli mikrometriä. Lisäksi hionta on lopetettava mikrometrin tarkkuudella oikeaan arvoon. Hionnan jälkeen kiekon pinnalla on ohut mekaaninen vaurio, se poistetaan kemiallismekaanisella kiillotuksella. Tämäkin vaihe on hyvin vaativa, sillä hionnassa saavutettu mittatarkkuus ei saa huonontua.

Kiillotuksen jälkeen kiekot vielä mitataan, puhdistetaan ja tarkastetaan ennen toimitusta komponentin valmistajille.

BSOI-kiekkio mikromekaniikassa

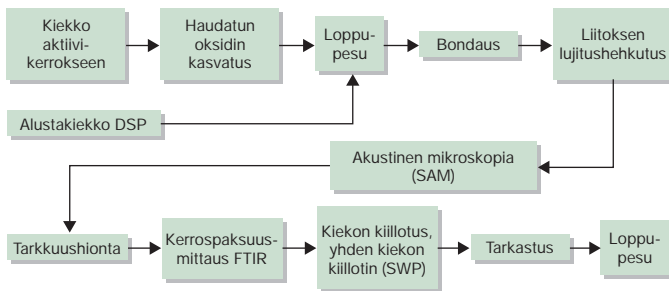
Syvän RIE-syövytyksen avulla voidaan valmistaa rakenteita, joiden valmistaminen on märkäsyövytyksellä joko mahdollonta tai erittäin vaikeaa. Esi-merkkeitä uusista SOI-kiekoja käyttävistä komponenteista ovat mikromekaaniset releet, kolmiulotteista liikettä mittaavat kiihtyvyyssanturit, kuituoptiikkaa käytettävät mikropeilit ja valokanavat.

Vaikka mikromekaaninen peili on vielä kallis komponentti on se kuitenkin yksinkertaisempi ja taloudellisempi ratkaisu verrattuna perinteiseen menetelmään, jossa kuidun valosignaali muutetaan ensin fotodiodilla sähköiseen muotoon ja lähetetään uudelleen laserilla valittuun kuituun. Suurimmat tällä hetkellä saatavat mikropeilikytinmatriisit ovat 16x16 kytkimiä, eli niissä on 256 mikropeiliä. Kehitteillä on myös kolmiulotteisia kytkimiä, eli niissä mikropeileillä kyetään kytkemään minkä tahansa tulevan valokuidun signaali kytkeään mihin tahansa lähtevään kuituun.

BSOI-kiekkojen muut käyttöalueet mikroelektronikassa

Tiheimmät ja nopeimmat mikropiirit tulevaisuudessa valmistetaan yhä yleisemmin SOI-kiekoille, joissa aktiivisen piikerroksen paksuus on muutamia satoja nanometrejä. Heti kun komponentin jännitekestoisuus tai tehonsietokyky nousee suureksi, on aktiivisen piikerroksen paksuutta kasvatettava muutama mikrometriin, ja on käytettävä BSOI-kiekkio.

Varsin yksinkertaisesti yksittäiset transistorit voidaan esimerkiksi erottaa sähköisesti toisistaan syövyttämällä komponenttien välinen pii pois DRIE-tekniikalla ja piirien jännitekestoisuutta voidaan kasvattaa muutama sataan volttiin; SOI-komponentit syrjäyttänevätkin perinteisellä dielekti-



Yksinkertaistettu BSOI-prosessikaavio

Simplified process flow of BSOI wafers

risellä isolointiteknikalla valmistetut piirit yksinkertaisemalla ja halvemmalla komponentin valmistusprosessilla.

IC-piirien integrointiaste kasvaa, ja joissakin tapauksissa pyritään saamaan muitakin piiriin tarvittavia komponentteja samalle piipalalle tavoitteena koko systeemin kustannusten lasku. Korkeilla taajuuksilla toimivat RF-piirit ovat tästä hyvänä esimerkkinä. Näihin piireihin on liitettävä mukaan passiivisia komponentteja, keloja, kondensaattoreita ja vastuksia. Nykykaikeilla kuparijohdotustekniikalla voitaneen esimerkiksi keulat integroida samalle piipalalle kannattavasti. BSOI-kiekkokerroksen

yhtenä vaihtoehtona alustamateriaaliksi, sillä hyvin resistiivisellä SOI-kerroksella ja paksulla oksidilla kyetään minimoimaan sähköisiä häviöitä.

Aika näyttää lyökö BSOI-kiekkokerroksen läpi tässä soveluksessa. Tutkijoilla on useita vaihtoehtoisia ratkaisumalleja, ja lopulta valitaan se tekniikka, jolla lopputuote saadaan soveltumaan massavalmistukseen ja kokonaiskustannukset miniiniin.

Bondaustekniikalla voidaan valmistaa hyvälaatuinen P/N-liitos. Normaalisti tehokomponenttien valmistukseen käytetään epi-kiekkokerroksia, joissa esimerkiksi voimakkaasti booriseoste-

tulle piipalustalle kasvatetaan CVD-tekniikalla korkeassa lämpötilassa paksu fosforiseostettu epikerros. Paksuja epikerroksia tekevillä reaktoreilla epin paksuuskontrolli on parhaimmillaan viisi prosenttia, laadukkaalla BSOI-prosessilla päästään +/- 0,5 mikrometrin paksuuskontrolliin, eli jo noin 20 mikrometrin lähtien BSOI-kiekkokerroksen homogeenisempi.

Epiprosessin ongelmana on myös dislokaatioliukumata, kiekkokerroksen reuna deformatuu plastiisesti ja deformaatiokohdissa dislokaatiot laskevat komponenttisaantoa. BSOI-kiekkokerroksissa ei liukumia ole. SOI-kiekkokerroksen käyttöä on toistaiseksi rajoittanut niiden kalleus epikiekkokerroksen rinnalla, hintaero kuitenkin kapeenee kun kiekkokerroksen kasvaa ja etenkin hinta/laatusuhde paranee.

Sitten kun esimerkiksi IGBT-transistorit tehdään 200 millimetrin kiekkoille, saattaa P+-alustan päälle tehty ensimmäinen ohut piikerros olla tehty epiprosessilla ja toinen paksu piikerros olla bondattu. Epitekniikkaa voidaan myös käyttää SOI-kalvon valmistukseen, epikalvot voidaan nimittäin kasvat-
taa joko hyvin resistiivisiksi tai

voimakkaasti seostetuiksi. Lopullisessa BSOI-kiekkokerroksessa aktiivikerros on vain epikalvo, alustakiekkokerroksen ohennetaan pois.

BSOI-kiekkokerroksen ei selvästikään ole vain yhden käyttösovelluksen tuote, vaan mahdollisia käyttökohteita on monia. Vaikka BSOI- valmistusprosessi on kallis, valmistuskustannukset eivät suoraan skaalautu kiekkokoon kasvaessa, ja periaatteessa samaa laitekantaa voidaan käyttää niin 100 kuin 200 millimetrin kiekkojen valmistuksessa. ●

Taustat

Kirjoittaja: DI Markku Tilli on Okmetic Oyj:n tutkimusjohtaja ja johtoryhmän jäsen.

Yhteystieto:
markku.tilli@okmetic.com

Tutkimus: BSOI-piikiekkokerroksia

Yhteistyössä: VTT, Okmetic Oy

Teknologiaohjelma: ETX